

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Hodnocení kvality IP telefonie v přístupových sítích

IP Telephony Speech Quality Evaluation in Access Networks

2015

Bc. Pavel Smolka, DiS.

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Pavel Smolka, DiS.

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Hodnocení kvality IP telefonie v přístupových sítích
IP Telephony Speech Quality Evaluation in Access Networks

Zásady pro vypracování:

1. Technologie přístupových sítí a IP telefonie.
2. Metody hodnocení kvality řeči.
3. Vytvoření simulačního modelu pro přístupové sítě s hodnocením MOS.
4. Experimentální verifikace modelu.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

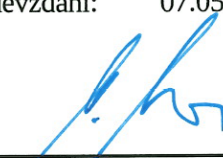
PARTILA, P., VOZNAK, M., KOVAC, A., HALAS, M. *Jitter Buffer Loss Estimate for Effective Equipment Impairment Factor*. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Issue 3, Volume 7, 2013, ISSN 1998-0159, pp. 241-248.
VOZNAK, M., REZAC, F. *Impact of IPsec on Speech Quality*. In Networking Studies 2010 Selected Technical Reports, p.71-90, CESNET, May 2010. ISBN 978-80-904173-8-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.**


Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *5. května 2015*



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Miroslavu Vozňákovi, Ph.D. za vedení, odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je popsat možnosti hodnocení kvality IP telefonie v přístupových sítích a provést vlastní verifikaci dostupných modelů na tyto sítě.

V první kapitole se věnuji základnímu popisu přístupových technologií, které se využívají jako přístupová média k celosvětové síti Internet a současně jako transportní sítě pro IP telefonii. V druhé kapitole se věnuji popisu metod, které slouží k hodnocení kvality řeči v telekomunikační technice. Zaměřuji se na dva modely objektivního hodnocení PESQ a AQuA, které používám dále v diplomové práci pro hodnocení. Při návrhu simulace přístupových sítí jsem využil softwarového simulátoru OPNET, ve kterém jsem vytvořil tři základní modely přístupových sítí a simuloval v nich datový tok mezi jednotlivými účastníky na základě připravených profilů. Čtvrtá kapitola se rozděluje na dvě oblasti. V první probíhá testování kvality telefonie v sítích, které jsou vytvořeny v laboratorních podmínkách a tvoří je fyzická rozhraní. Jednotlivé technologie a jejich parametry jsou simulovány pomocí aplikace v Linuxovém jádře. Druhá oblast kapitoly se soustředí na praktické testy, které probíhaly ve skutečných provozovaných sítích. V závěrečné kapitole porovnávám výsledky jednotlivých modelů a technologií.

Klíčová slova

IP telefonie; sítě; technologie; metody hodnocení; kvalita řeči; subjektivní; objektivní; MOS; přístupové sítě; experimentální verifikace; parametry sítí; SIP.

Abstract

The aim of the thesis is to describe the possibilities for evaluating the quality of IP telephony in access networks and carry out its own verification of models available on these networks.

The first chapter deals with the basic description of access technologies, which are used as media access to the global network and the Internet as a transport network for IP telephony. In the second chapter, the methods used to evaluate speech quality in telecommunication technology are described. I focus on two models for objective assessment PESQ and Aqua, which I use later in the thesis for evaluation. When designing the access network simulation software, I used OPNET simulator in which I created three models in the access network and simulate them in the data flow between the various participants on the basis of prepared profiles. The fourth chapter is divided into two areas. In the first section, the quality telephony networks that are created in the laboratory is tested and it is composed of physical interfaces. Individual technologies and their parameters are simulated using the Linux kernel. The second part of the chapter focuses on practical tests, which took place in the actual operating networks. In the final chapter, the results of various models and technologies are compared.

Key words

IP telephony; network; technology; evaluation methods; speech quality; subjective; objective; MOS; Access Network; Experimental verification; Parameters networks; SIP.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
t	s	Čas
f	Hz	Frekvence
λ	μm	Vlnová délka

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
GSM	Global System of Mobile
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
JTS	Jednotná Telefonní síť
PSTN	Public Switched Telephone Network
ISDN	Integrated Services Digital Network
DSL	Digital Subscriber Line
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
VDSL	Very-high-speed Asymmetric Digital Subscriber Line
UTP	Unshielded Twisted Pair
STP	Shielded Twisted Pair
FTP	Foil-shielded Twisted Pair
SFTP	Shielded Foiled Twisted Pair
TDM	Time Division Multiplexing
VoIP	Voice over Internet Protocol
DMT	Discrete Multi Ton Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
NR	Signal Noise Ratio
IPTV	Internet Protocol Television
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CATV	Cable television
CMTS	Cable modem termination system
MM	Multi Mode
SM	Single Mode
SNMP	Simple Network Management Protocol
WDM	Wavelength Division Multiplexing

FTTx	Fiber To The (Node, Curb, Basement, Home, Premises)
PON	Passive Optical Network
AES	Advanced Encryption Standard
ATM	Asynchronous Transfer Mode
FBG	Fiber Bragg Grating
WLAN	Wireless Local Area Network
AP	Access Point
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
LOS	Line Of Sight
MIMO	Multiple Input Multiple Output
QoS	Quality of Service
LQ	Listening Quality
CQ	Conversational Quality
MOS	Mean Opinion Score
3SQM	Single Sided Speech Quality Measure
PAMS	Perceptual Analysis Measurement System
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality
AQuA	Audio Quality Analyzer
OPNET	Optimum Network Performance
SIP	Session Initiation Protocol
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
HD	High Definition
LTE	Long Term Evolution
OLT	Optical Line Termination

Obsah

Úvod.....	- 12 -
1 Technologie přístupových sítí a IP telefonie.....	- 13 -
1.1 Metalické sítě	- 13 -
1.1.1 Technologie DSL	- 14 -
1.1.2 SDSL (Symetric Digital Subscriber Line).....	- 14 -
1.1.3 ADSL (Asymetric Digital Subscriber Line).....	- 15 -
1.1.4 ADSL2.....	- 16 -
1.1.5 ADSL2+	- 16 -
1.1.6 VDSL.....	- 17 -
1.1.7 Ethernet IEEE 802.3	- 18 -
1.1.8 CSMA/CD	- 20 -
1.1.9 CATV	- 20 -
1.2 Optické sítě.....	- 21 -
1.2.1 PON	- 24 -
1.3 Bezdrátové sítě	- 26 -
1.3.1 WLAN 802.11	- 27 -
1.3.2 WiMAX 802.16.....	- 28 -
2 Metody hodnocení kvality řeči.....	- 30 -
2.1 Subjektivní metoda.....	- 30 -
2.1.1 Konverzační metoda.....	- 30 -
2.1.2 Poslechová metoda	- 31 -
2.1.3 Stupnice hodnocení	- 31 -
2.2 Objektivní metoda	- 31 -
2.2.1 Jednokanálové měření (Non-intrusive metod)	- 32 -
2.2.2 Dvoukanálové měření (Intrusive metod)	- 33 -
3 Vytvoření simulačního modelu pro přístupové sítě s hodnocením MOS.....	- 36 -
3.1 Simulace ADSL.....	- 40 -
3.2 Simulace Ethernet	- 40 -

3.3	Simulace WiFi.....	- 41 -
3.4	Závěr simulací.....	- 41 -
4	Experimentální verifikace modelu	- 42 -
4.1	Laboratorní verifikace.....	- 43 -
4.1.1	Příkazy NETEM.....	- 43 -
4.1.2	Parametry přístupových sítí.....	- 44 -
4.1.3	Konfigurace Asterisk.....	- 45 -
4.1.4	Hodnocení pomocí PESQ.....	- 47 -
4.1.5	Hodnocení pomocí AQuA.....	- 50 -
4.2	Reálná verifikace.....	- 50 -
5	Zhodnocení dosažených výsledků.....	- 52 -
5.1	Vyhodnocení AQuA.....	- 52 -
5.2	Vyhodnocení PESQ.....	- 55 -
6	Závěr	- 57 -
	Použitá literatura	- 58 -
	Seznam příloh.....	- 60 -

Úvod

Tato diplomová práce pojednává o hodnocení kvality IP telefonie v přístupových sítích. IP telefonie je provozování běžných telefonních hovorů přes „počítačovou“ IP síť. IP telefonie jako taková se začíná hojně rozšiřovat. Tomuto trendu napomohla Evropská unie svými směrnici o přenositelnosti pevných telefonních číslech. Přenos pevných telefonních čísel je v Česku možný od roku 2003. Někteří pevní operátoři využili právě této možnosti a nabídli převod PSTN služby na SIP. Z praxe jsou mi známy převody standardních telefonních okruhů na datové přípojky. Zejména DSL a to jak ve variantě ADSL tak i rychlejší VDSL. Nese to svou výhodu pro poskytovatele služeb, kteří tuto variantu preferují. Vzhledem k úbytku klasických telefonních přípojek, se začíná provoz telefonních ústředen prodražovat a je nežádoucí pro ekonomy potažmo ředitele společností. Datové okruhy, na které se přesouvají telefonní služby, byly původně zřizovány ke komunikaci mezi uživateli a přístupu k Internetu. Přes Internet se přenáší velké objemy dat, které mohou narušovat stabilitu spojení. Nemluvě o mechanismech omezujících rychlost přenášených dat, které tak mohou narušit i telefonní komunikaci. Proto je pro nás stále důležitější posuzovat kvalitu spojové vrstvy.

Hodnocení kvality IP telefonie (Voice over IP, VoIP) tvoří nedílnou část jakékoli sítě, která podporuje, respektive má podporovat tento provoz. IP telefonie není nijak náročná na hardwarovou strukturu sítě ani na propustnost, nýbrž na její stabilitu. Kvalita se posuzuje za pomoci atributů, které jsou popsány v dalších kapitolách této diplomové práce.

Technologie přístupových sítí a IP telefonie bývá zpravidla tatáž. Proto je můžeme jednoduše rozdělit podle média, které používají pro přenos dat na: Metalické, Bezdrátové a Optické. Každé z těchto typů médií, je vůči svým konkurentům jistým způsobem zvýhodněno i znevýhodněno. Nyní záleží na zákazníkovi, jaké přenosové médium si zvolí. Velmi často se stává, že vyhrává připojení, které nabídne nejnižší cenu a nejvyšší rychlost. Tato varianta zpravidla nekoreluje se správnou volbou pro IP telefonii. IP telefonie potřebuje ke své správné funkci kvalitní přípojku. Kvalitní přípojkou se nerozumí jen nízká latence (zpoždění), veřejně označovaná za „Ping“, která je bezesporu její součástí, ale i tzv. „Jitter“, což je odborný název pro rozptýl zpoždění. Jedná se o nežádoucí odchylku ve zpoždění odpovědi severu „Ping“. Tyto hodnoty se zvyšují jistou úměrou využitím dané přenosové linky.

Velkou nevýhodou jednotné sítě pro data i hovor je fakt, že datová komunikace „Internet“ se od telefonie běžně neodděluje. Je možné použít mechanismy, které jsou schopny určitým způsobem preferovat právě pakety telefonie před běžnými daty uživatele. Tato služba sítě se nazývá QoS (Quality of Services), jedná se o softwarovou nastavbu směrovačů, která nemusí vždy fungovat správně. Já osobně preferuji právě oddělené sítě pro data a hovor, vyvaruji se tak nechtěných komplikací. Tato varianta je vhodná především pro firemní zákazníky. Běžný uživatel preferuje nízkou cenu přípojky a tak se spokojí i s občasnými komplikacemi při hovoru. Ze své osobní zkušenosti mohu zmínit jeden případ, kdy jsem zajišťoval převod pevných telefonních služeb na IP telefonii.

1 Technologie přístupových sítí a IP telefonie

Přístupová síť je definována jako fyzické rozhraní mezi koncovým uživatelem a službou poskytovanou provozovatelem. Jejím úkolem je zajistit přenos od poskytovatele k uživateli v co nejvyšší kvalitě a nejkratším časovém intervalu. Základem přístupové sítě je přenosové médium a nosič informace. Podle typu přenosového média dělíme přístupové sítě do tří základních kategorií.

Nejstarší médium používané pro přenos informace je atmosféra. Sloužila jako nosič kouřových signálů, které byly čitelné na velkou vzdálenost. V moderních technologiích jsme udělali nemalý pokrok a vyměnili jsme kouřové signály za elektromagnetické vlny či záření.

Druhým nejstarším médiem je metalické vedení, které zaznamenalo velký třesk s vynálezem telegrafu. Od roku 1837, kdy Samuel Morse představil svůj telegraf, se toho změnilo hodně, ale základ přetrval. Metalické vedení je dnes nedílnou a nejčastěji používanou součástí přístupových sítí.

Médiem posledním a nejmodernějším je optický kabel. V minulosti se pomocí optických kabelů propojovaly pouze páteřní body sítí. Se stále vzrůstající poptávkou po propustnosti, se toto médium instaluje i jako přístupové. Jeho největší výhodou je cena. Křemík, který tvoří základní surovinu, se na naší planetě hojně vyskytuje a je snadno zpracovatelný. Optické kabely jsou schopny přenášet data na velké vzdálenosti bez potřeby instalace zesilovačů a opakovacích signálů.

Tři základní kategorie, na které se přístupová média dělí:

a) Metalické sítě

- symetrická vedení – místní sdělovací kabely, vnitřní a venkovní Ethernet vedení
- nesymetrická vedení – koaxiální kabely pro počítačové sítě, průmyslové sběrnice a kabelové televize

b) Optické sítě

- optické kabely tvořeny skleněnými/plastovými vlákny
- optické atmosférické spoje

c) Bezdrátové sítě

- telefonní GSM sítě
- WiFi, WiMAX
- satelitní komunikaci

1.1 Metalické sítě

Metalické sítě jsou nejstarším typem přístupových sítí, které se používaly a pro jejich rozšiřitelnost se stále používají. Nejvíce zastoupeným typem v této oblasti jsou symetrická vedení.

Do této podmnožiny patří místní sdělovací kabely JTS (Jednotná telefonní síť), které se instalovaly na našem území pro společnost Český Telekom v 90. letech 20. století. Dnes se tyto kabely využívají jako nosiče služeb: PSTN, ISDN, ADSL, VDSL a jejich vylepšení. Některé tyto služby je možné kombinovat na jedno vedení.

Do metalických sítí nezbytně patří vedení pro Ethernet. Pro potřeby tohoto protokolu jsou za potřeby jiné kabely než kroucené dvoulinky z předešlé JTS. Ethernet pro svou komunikaci potřebuje dva páry kroucené linky. Pro každý datový směr jeden pár vodičů (Tx, Rx). Pro vnitřní rozvody se využívají kabely UTP (Unshielded Twisted Pair) a STP (Shielded Twisted Pair). Pro venkovní rozvody je doporučeno používat kabely FTP (Foiled Twisted Pair) nebo SFTP (Shielded Foiled Twisted Pair).

1.1.1 Technologie DSL

DSL (Digital Subscriber Line) je technologie, která umožňuje využívat stávající sdělovací kabely JTS, pro vytváření datových přípojek souběžně nebo samostatně s telefonní službou. Tato technologie prošla v minulosti razantním vývojem. Technologie umožňuje nasazení méně často používaného symetrického připojení SDSL (Symetric Digital Subscriber Line), ale také nejčastěji používané ADSL (Asymetric Digital Subscriber Line). U technologie DSL obecně platí, čím větší vzdálenost od ústředny, tím nižší dosažitelná rychlost. Jednotlivé typy DSL sítí se liší v používaném frekvenčním pásmu.

Tabulka 1.1: *Rozdělení DSL*

Digital subscriber line (DSL)		
Symetrické	ANSI/ETSI/ITU-T	HDSL, HDSL2 a HDSL4, SHDSL
	Proprietární	IDSL, SDSL, MSDSL, Etherloop, HVDSL, DSL Ring
Asymetrické	ANSI/ETSI/ITU-T	ADSL, ADSL2, ADSL2+, VDSL, VDSL2
	Proprietární	RADSL, UDSL

1.1.2 SDSL (Symetric Digital Subscriber Line)

SDSL jsou symetrické linky používající jedno kroucené měděné dvoudrátové vedení s nejvyšší přenosovou rychlostí 2,3 Mbit/s na maximální vzdálenost 3 km. Tato technologie nebyla nikdy standardizována. Existuje předchůdce G.SHDSL, který byl standardizován v roce 2001 ITU-T G.991.2b. Symetrický přenos znamená stejnou rychlost pro Downstream i Upstream. Výhodou tohoto řešení je vyšší přenosová rychlost na Upstream než u technologií ADSL. Této

výhody se využívá v podnikových sítích, kde se obvykle implementuje VPN připojení k intranetu a je zapotřebí rychlejšího připojení.

1.1.3 ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

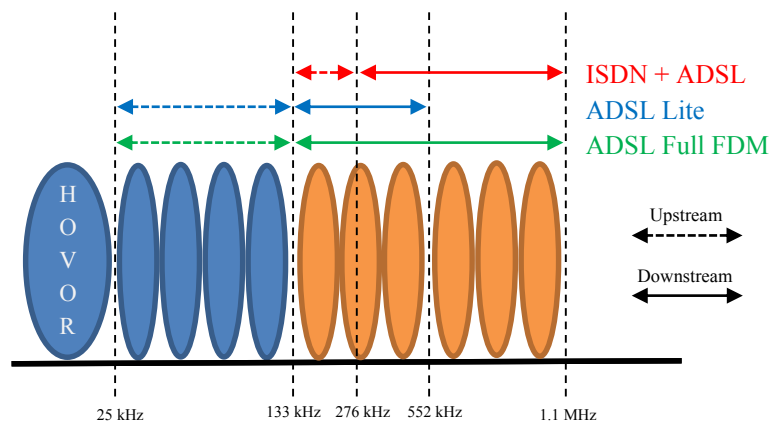
ADSL je označení pro asymetrickou digitální linku, která umožňuje zřídit vysokorychlostní datové připojení po krouceném dvoudrátovém měděném vedení. Velkou předností oproti symetrickým DSL je schopnost provozovat na stejném vedení přenos dat i telefonních hovorů. K provozu datového a telefonního spojení je zapotřebí umístit na začátek a konec frekvenční filtry, tzv. "Splitter". Obě služby fungují na sobě nezávisle, vzájemně se neovlivňují.

Rychlost Downstreamu ADSL se pohybuje v rozmezí 32 až 6144 kbit/s a Upstreamu v rozmezí 32 až 640 kbit/s. V rozmezí 32 až 640 kbit/s působí ADSL jako symetrické datové připojení. Tato rychlost se ovšem v praxi příliš často nepoužívá.

Systém ADSL využívá diskrétní vícetónovou modulaci DMT (Discrete Multi Tone Modulation). Tato modulace rozděluje celou šířku pásma do několika samostatných kanálů o šířce 4,3125 kHz. Kmitočtové rozdělení je zobrazeno na obrázku 1.1. Pro modulaci všech těchto samostatných kanálů, které mají rychlost 4000 Bd/s (symbolová rychlost), se používá QAM (Quadrature Amplitude Modulation). U každého kanálu se navíc změří SNR (Signal Noise Ratio) a odstup signál šum. Kanály, které mají SNR menší než stanovený limit, se do modulace nezahrnou. Systém se tímto krokem chrání proti výpadkům v komunikaci. Snížené SNR může být způsobeno útlumem vedení, šumem nebo přeslechy z jiných komunikačních vedení.

Technologie xDSL je na území České republiky stále oblíbená navzdory tomu, že na řadě území je dostupná modernější technologie VDSL, která nabízí vyšší přenosovou rychlost na stejném vedení. Tyto informace vycházejí ze zdroje výsledku hospodaření společnosti Telefónica O2, 1. kvartálu roku 2014. Společnost Telefónica O2 Czech Republic a.s., dříve Český Telekom a.s., je majoritním vlastníkem telefonního vedení budovaného v 90. letech 20. století.

Počet přípojek xDSL dosáhl k 31. březnu 2014 výše 918 tisíc. Ke stejnému datu využívalo službu vysokorychlostního internetu založenou na technologii VDSL již 379 tisíc zákazníků (o 31,5 % více v meziročním srovnání), +18 tisíc za období, z toho 12 tisíc v rezidentním segmentu. Již 41 % celkového počtu zákazníků xDSL služeb a 82 % celkové zákaznické báze, která je v dosahu technologie VDSL (cca 50 % domácností) přešlo na vylepšenou službu. Počet zákazníků služby O2 TV překonal na konci března 2014 výše 163 tisíc, meziročně o 15,8 % více, díky nové inovativní IPTV platformě spuštěné v roce 2013 a vysoce pozitivnímu přijetí u zákazníků. [1]



Obrázek 1.1: Kmitočtové rozdělení ADSL ve spektru [13]

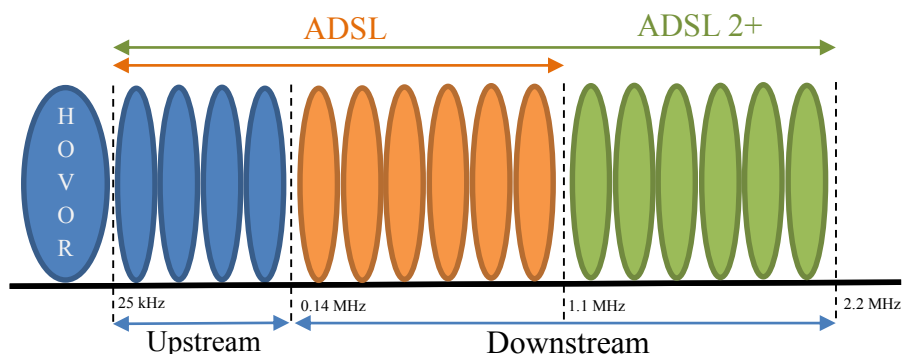
1.1.4 ADSL2

ADSL2 je vylepšený následovník technologie ADSL. Stejně jako jeho předchůdce používá pro přenos médium metalického dvoudrátového krouceného měděného vedení. Vylepšení technologie ADSL přineslo navýšení maximální přenosové rychlosti na 8 Mbit/s Downstream a 800 kbit/s Upstream. ADSL2 přejímá výhody svého předchůdce, tzn. může být použito společně s analogovou telefonní přípojkou, integrovanou přípojkou ISDN (Integrated Services Digital Network) nebo v plně digitálním režimu. Plně digitální režim využívá celého kmitočtového spektra od 3 kHz do 1104 kHz. Tento režim umožňuje navýšení přenosové rychlosti Upstreamu o 256 kbit/s.

1.1.5 ADSL2+

ADSL2+ je nejmodernější vylepšení ze všech ADSL systémů. Jeho vylepšení spočívá v navýšení šířky pásma až do frekvence 2208 kHz. To znamená dvojnásobnou šířku pásma než předešlé ADSL2. V tomto vylepšení došlo k navýšení šířky pásma v oblasti Downstreamu, to znamená, že se jeho přenosová rychlost zvýšila z 8 Mbit/s na 16 Mbit/s. Přenosová rychlost Upstreamu (směrem od účastníka k ústředně) zůstala beze změny na 800 kbit/s. Navýšení frekvenčního pásma je dobře viditelné na obrázku 1.2.

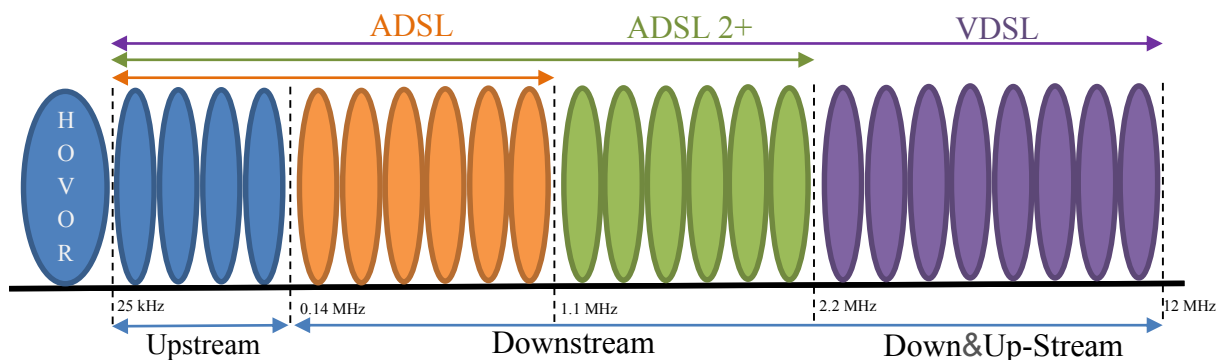
Vylepšení dalo vzniknout multimediální službě Triple Play. Tato služba umožňovala sledování televizního vysílání přes internet (IPTV). Pokud měli zákazníci zájem o tuto službu, museli splnit několik podmínek. Jedna z nejdůležitějších byla vzdálenost, která nesměla překročit 4 km od ústředny. Další vylepšení snižovalo čas potřebný modemu k synchronizaci s DSLAMem, časový interval se z 10 sekund zkrátil na pouhé 3 sekundy.



Obrázek 1.2: Kmitočtové rozdělení ADSL2+ ve spektru

1.1.6 VDSL

VDSL je digitální účastnická přípojka (Very High Bitrate DSL), která se vyznačuje nejvyšší rychlostí ze skupiny xDSL. Tento standard je neustále rozvíjen a rozšiřován. Technologie umožňuje asymetrický i symetrický přenos dat a multimédií po účastnickém dvoudrátovém vedení. Technologie může být provozována souběžně se standardní analogovou telefonní linkou nebo samostatně. V případě provozování VDSL s hovorovými službami je nutné vybavit připojovací a zakončovací část vedení rozbočovačem, stejně jako u jiných DSL technologií.



Obrázek 1.3: Kmitočtové rozložení VDSL2 ve spektru

Ve standardu VDSL rozlišujeme profily, které jsou číslovány podle šířky přenosového pásma na 8, 12, 17 a 30. S touto šířkou pásma nám narůstá rychlost přenosu dat, u profilu 30a je tato souhrnná rychlost 200 Mbit/s. VDSL technologie dokáže přenést 100 Mbit/s do vzdálenosti 500 m, 50 Mbit/s do vzdálenosti 1 km. Od vzdálenosti 1,6 km je rychlost VDSL srovnatelná s ADSL2+.

Z vlastní zkušenosti vím, že rychlost na účastnické straně nedosahuje zdaleka tak vysokých čísel jako se píše v technických specifikacích. V centru městské aglomerace (Olomouc)

máme zřízené připojení VDSL a jeho rychlost dosahuje maximálně 18 Mbit/s Downstream a 2 Mbit/s Upstream. Vzdálenost od ústředny je 780 m (zjištěno od poskytovatele).

Tabulka 1.2: *Klasifikace VDSL a jejich rychlosti [6]*

Profil	Šířka pásma [Mhz]	Počet nosičů pro downstream	Šířka pásma nosiče [kHz]	Minimální obousměrná rychlost přenosu [Mbit/s]
8a	8,832	2048	4,3125	50
8b	8,832	2048	4,3125	50
8c	8,5	1972	4,3125	50
8d	8,832	2048	4,3125	50
12a	12	2048	4,3125	68
12b	12	2783	4,3125	68
17a	17,664	4096	4,3125	100
30a	30	3279	8,625	200

1.1.7 Ethernet IEEE 802.3

Tato technologie, která byla standardizována v roce 1980, se může pochlubit svou 35 letou úspěšnou historií. Hojně využívaná technologie tvoří základ většiny sítí po celém světě. Od svého zrodu se dočkala velkého množství vylepšení. Největší předností této technologie je cena, která je doprovázena jednoduchostí protokolu a z toho vyplývající náročnost na servis a další rozvoj.

Verze Ethernetu:

- **10Base5:** Označovaný také jako "Tlustý Ethernet" Thick. Je nejstarším typem, který jako nosič signálu používá koaxiální kabel. Tato varianta dosahuje rychlosti 10 Mbit/s na vzdálenost až 500 m bez opakovacího signálu. Slovo "Base" obsažené v názvu nám říká, že přenos je prováděn v tzv. "základním pásmu", není použita modulace. Topologií sítě je sběrnice, do které se ostatní stanice připojují pomocí transceiverů. Vedení je na obou stranách zakončeno odporem, aby na koncích vedení nedocházelo k odrazům signálu.
- **10Base2:** Je nástupce předchozí verze 10Base5. Oproti svému předchůdci se dočkal tenčího koaxiálního kabelu. Maximální vzdálenost mezi uzly se zkrátila na 185 m. Velkou výhodou nového typu bylo snadné rozšíření o další segment sítě. Jednotlivé

segmenty jsou spojovány pomocí BNC konektorů, které zajišťují snadnou a částečně i laickou montáž.

- 10Base-T: V této variantě Ethernetu došlo k výměně koaxiálního kabelu za kroucené dvoudrátové vedení. Tato varianta se používá do dnešní doby. Velkou výhodou je nízká cena kabelů (UTP) a zakončovacích konektorů (RJ45). Přenosová rychlost zůstala zachována na 10 Mbit/s.
- 10Base-F: Varianta s přenosovou rychlostí 10 Mbit/s, využívající jako nosné médium optický kabel. Tato varianta má své nesporné výhody v délce vedení, které může dosahovat stovek metrů a odolnosti na elektromagnetické rušení.
- 100Base-TX: Varianta pracuje s rychlostí 100 Mbit/s. Poprvé se začíná hovořit o „Fast Ethernet“. Pro přenos používá dva páry UTP kabelu kategorie 5 (UTPc5E).
- 100Base-T2: Tato varianta používá dva páry UTP kabelů 3, 4 nebo 5. Je vhodná pro použití se starším vedením.
- 100Base-T4: Tato varianta používá pro přenos čtyři páry UTP kabelů 3, 4 nebo 5. Tato norma je opět vhodná pro použití se staršími kabely.
- 100Base-FX: Pro přenos dat používá optické kabely, přenosová rychlost 100 Mbit/s.
- 1000Base-T: Tato varianta překonala další milník v přenosové rychlosti. Nyní hovoříme o "Gigabit Ethernet". Přenosová rychlost 1000 Mbit/s = 1 Gbit/s. Využívá 4 páry UTP kabelů do vzdálenosti 100 m.
- 1000Base-CX: Gigabitový Ethernet, který využívá pro přenos twinaxiální kabel (koaxiální měděný, jednožilový kabel). Propojení na krátké vzdálenosti to 25 m. Využívá se v data-centrech.
- 1000Base-SX: Gigabitový Ethernet, který využívá pro přenos multimódové optické kabely. Dosah na kratší vzdálenosti, stovky metrů.
- 1000Base-LX: Gigabitový Ethernet, který využívá pro přenos singlemódové optické kabely. Dosah na větší vzdálenosti, desítky kilometrů.
- 10GBase-T: V této variantě hovoříme o přenosové rychlosti 10 Gbit/s do vzdálenosti 55 m s běžnými UTP kabely. Pro zvýšení překlenutelné vzdálenosti je nutné použít kabely označované kategorie 6a. S těmito kabely se vzdálenost zvýší na 100 m. Nově u této kategorie hovoříme o šířce pásma 500 MHz.

- 40GBase: Přenosová rychlost 40 Gbit/s. Nosným médiem signálu jsou optické kabely. Pro kratší vzdálenosti je možné použít i Ethernetový kabel, však s maximálním dosahem 10 m.
- 100GBase: Přenosová rychlost 100 Gbit/s. Nosným médiem signálu jsou optické kabely. Pro kratší vzdálenosti je možné použít i Ethernetový kabel, však s maximálním dosahem 10 m.

1.1.8 CSMA/CD

Jedná se o přístupovou metodu, na které je založena celá technologie Ethernet. Pojem CSMA/CD je základním principem a jednoduchostí celé této technologie. Výhoda tohoto systému je zároveň i velkou slabinou, která jej omezuje. Vzhledem k tomu, že se tato metoda používá i u Gigabit Ethernet, je důležité se o ní zmínit.

CSMA (Carrier Sense Multiple Access) je zkratka, která se skládá ze dvou částí:

- Carrier Sense (Naslouchání nosné): Popisuje vysílač, který naslouchá nosnou vlnu před samotným vysíláním. To znamená, že detekuje signál, vysílaný jiným vysílačem příjemci, před svým vysíláním. V případě, že dojde k detekci nosné, vysílač vyčká až do okamžiku, kdy vysílání přestane.
- Multiple Access (Vícenásobný přístup): Popisuje médium, na které je v daný okamžik připojeno více vysílačů a příjemců. Vysílání jednoho vysílače, je přijímáno všemi příjemci naslouchajícími na stejném segmentu, jako je vysílač.

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection) je zkratka pro mechanismus detekce kolizí v CSMA. S tímto vylepšením jsou vysílače schopny detekovat okamžik kolize. V případě, že kolizi detekují, jsou schopny okamžitě vysílání zastavit a počkat nezbytnou dobu k dalšímu pokusu o vysílání. Tento mechanismus přispívá k efektivnějšímu využití času pro vysílání rámců. Kolize vzniká na médiu, kde naslouchá více stanic, které jsou připraveny vysílat. V okamžiku, kdy jsou dvě stanice připraveny vysílat, detekují volné médium a začnou souběžně vysílat a dojde tak ke kolizi. V tomto případě nebude ani jedna ze zpráv správně přenesena k příjemci. V sítích CSMA/CD platí, že stanice, která první detekuje kolizi, vyšle signál (jam), který oznámí kolizi všem zařízením na segmentu.

1.1.9 CATV

CATV je zkratka Community Antenna Television. V naší zemi nese označení STA (Společná Televizní Anténa). Podstata této technologie je založena na jednom přijímacím místě televizního signálu a jeho mnohonásobná distribuce koncovým uživatelům.

Kabelové televize mají za úkol rozšiřovat nabídku televizních programů. Pro přenos obrazu využívají metalické vedení, z velké části koaxiální kabely. Tyto kabelové sítě tvoří rozsáhlou topologickou strukturu, zejména v městských aglomeracích. Díky vysokému pokrytí těchto sítí se vypracovala na počátku 21. století technologie, která umožňuje provozovat na stejném vedení i datová spojení.

Dříve se k propojování segmentů kabelových sítí používaly striktně koaxiální kabely. Na konci 20. století se začaly hojně rozšiřovat optické sítě, proto se koaxiální sítě změnilly na opticko-koaxiální sítě. Optické segmenty slouží převážně jako point-to-point sítě mezi jednotlivými uzly koaxiálních rozvodů.

Kabelové televize vysílaly při svém zrodu pouze analogový signál. Dnes v době digitálního věku provádí radikální změny v nabízených službách. Hlavní změnou se stal přechod analogového vysílání na digitální, které dokáže efektivněji využívat spektrum. Nabízí funkci komprese obrazu a tím i větší počet nabízených programů. V analogových sítích se na každou účastnickou přípojku musely umísťovat filtry pro potlačení frekvencí s nabízenými programy. V digitální nabídce se blokování programů provádí až na straně uživatele. Ke všem uživatelům jdou všechny programy a uživatel na základě smlouvy a přiděleného klíče, programy dešifruje. Tato skutečnost celý systém zlevnila a umožnila snížení počtu servisních zásahů v rozvaděčích.

Pro přenos dat přes síť CATV je nutné použít speciálních převodníků/modemů označovaných jako CMTS (Cable Modem Termination System). Tyto modemy mohou být obsaženy přímo v koncových stanicích (počítače, servery, terminálové stanice) nebo samostatně. Modem má za úkol převádět rozhraní Ethernet na výstupní koaxiální rozhraní. Přenášený Ethernetový datový provoz je převáděn do tzv. Downstreamu a Upstreamu. Streamy jsou na koaxiálním vedení reprezentovány jako dva samostatné televizní kanály.

Koncová digitální zařízení jsou z důvodu bezpečnosti a stability systému sledována dálkově pomocí SNMP zpráv. Protokol SNMP (Simple Network Management Protocol) slouží k průběžnému sběru dat pro potřeby správy sítě.

1.2 Optické sítě

Koncepce optického propojení byla vypracována nezávisle na dnes běžně používaných mechanismech přenosu dat. Optické sítě, jak už vyplývá z názvu, používají jako nosič informace optické vlákno. Díky této technologii jsme schopni překlenout velké vzdálenosti, třeba i propojit kontinenty podmořskými kabely. Optické sítě lze rozdělit do několika kategorií.

Rozdělení podle typu vlákna:

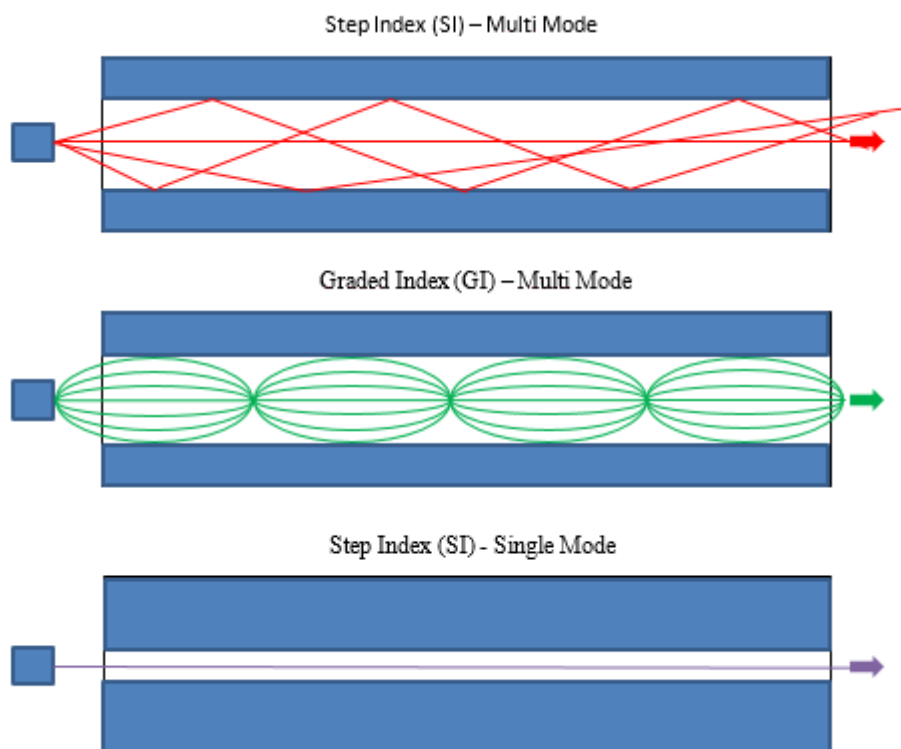
- Multi Mode (MM) – více módová vlákna
- Single Mode (SM) – jedno módová vlákna

Multi módové systémy využívají optická vlákna, která mají průměr jádra 50 nebo 62 μm . Toto relativně tlusté jádro dokáže navázat více světelných paprsků. Systémy s více vidy mají jeden velký nedostatek a tím je přenos na krátké vzdálenosti do 500 m, s použitím speciálních

komponent až do 2000 m. Omezení má svědomí tzv. vidová disperze. Tento jev způsobuje, že se některé paprsky dostanou na druhou stranu vlákna dříve než ostatní. Detektor na přijímači pak nedokáže rozeznat stav 1 od 0 a soustava se rozpadne. Částečně lze tento jev potlačit použitím vlákna s gradientním jádrem. Gradientní jádro se postará, aby paprsky vystoupily z vlákna ve stejném čase.

Nespornou výhodou MM technologie je nízká náročnost na čistotu. Pokud provozujeme síť v průmyslové zóně nebo v místě se zvýšenou prašností je MM jasná volba. Díky tomu, že se ve vlákne šíří více paprsků, můžeme si dovolit nějakou tu ztrátu na nečistotách. Výhodou MM technologie byla nízká cena všech komponent oproti SM.

Dnes se ceny mezi oběma technologiemi vyrovnaly. Jsou mi známé i případy, kdy jsou MM komponenty dražší než SM. Může za to marketink a výrobní plán společností. Pokud je nějaké komodity nedostatek, většinou zvýší svou cenu.



Obrázek 1.4: Vlákná SI a GI

Single módobé systémy využívají optická vlákna, která mají průměr jádra $9\text{ }\mu\text{m}$. Celkový průměr vlákna pak činí stejně jako u MM $125\text{ }\mu\text{m}$. Tenčí jádro nám zaručí návaznost jen jednoho vidu. Díky tomu, že eliminujeme vidovou disperzi, se nám zvýší dosah. Současně musíme zvýšit výkon laseru. SM systémy zvládnou bez větších komplikací překlenout vzdálenost 20 km.

Single módové systémy mohly dát vzniknout celé řadě vylepšení a novému odvětví. Měřicí a řídicí optické systémy jsou dnes velice populární. Pomocí optického vlákna dokážeme měřit celou řadu veličin: teplotu, tlak, napětí, pnutí, chemické složení látek apod.

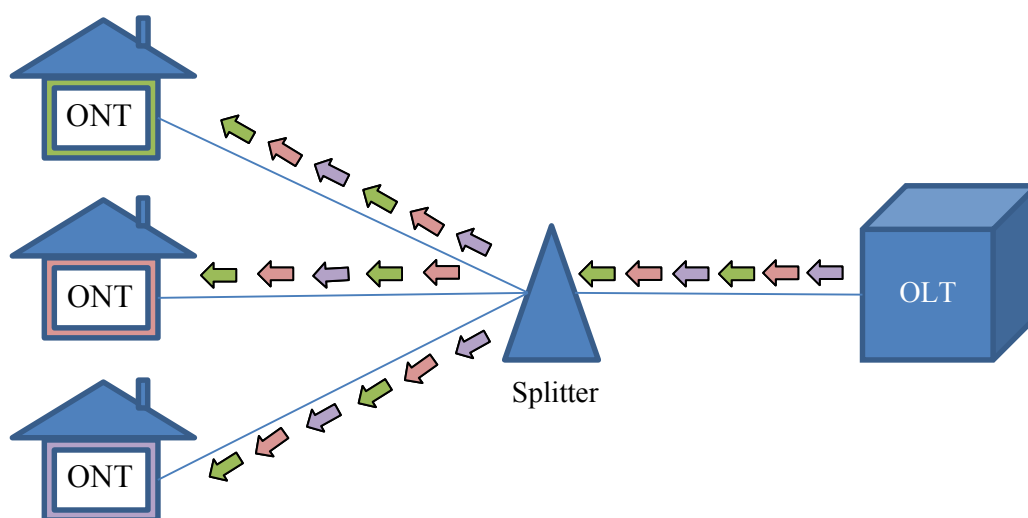
Moderní SM vlákna dokáží vést světlo v obou směrech, bez toho aniž aby se paprsky vzájemně ovlivňovaly. Této výhody využívá systém WDM (Wavelength-division multiplexing), česky "Vlnový multiplex", který dokáže v jednom jádru vést až 80 odlišných kanálů (DWDM).

DWDM (Dense Wavelength-division multiplexing) se využívá zejména na páteřních spojkách mezi centrálními uzly sítí. Se systémem WDM se můžeme setkat v běžných distribučních sítích pro koncové uživatele. Tyto sítě nesou označení FTTx (Fibre To The x), za ono „x“ se dosazují písmena N (Node), C (Cabinet), B (Building/Basement) a H (Home).

- FTTN (Fiber To The Node) – optické vlákno je zakončeno až několik kilometrů od zákazníka, koncové připojení je pak realizováno pomocí metalického spoje (xDSL).
- FTTC (Fiber To The Cabinet) – velmi se podobá FTTN, liší se pouze vzdáleností, hovoříme-li o této technologii, musí být rozvaděč umístěn nejvýše 300m od účastníka.
- FTTB (Fiber To The Building/Basement) – optické zakončení je realizováno přímo v budově u centrálního rozvaděče.
- FTTH (Fiber To The Home) – označení pro zakončení optického vlákna v obytné místnosti domu.

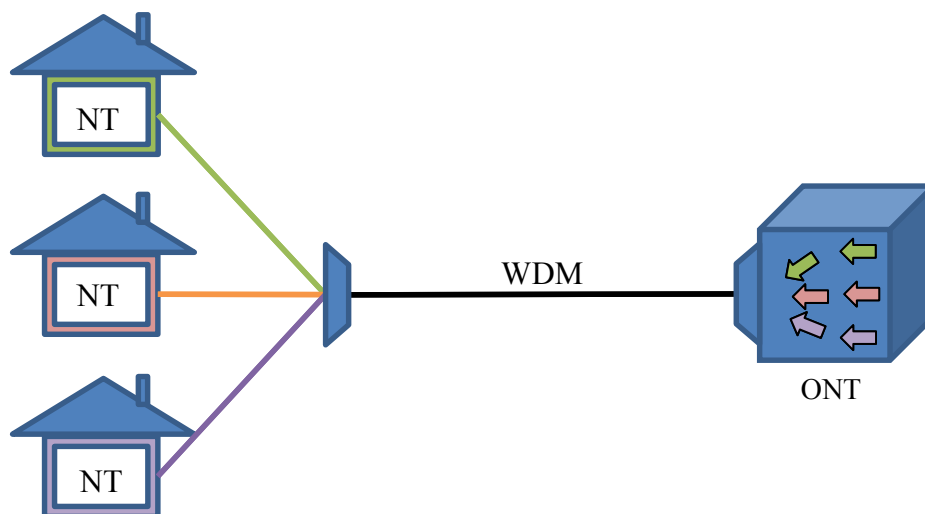
1.2.1 PON

Pasivní optické sítě (Passive Optical Network) neboli PON jsou optické sítě, které mají svou infrastrukturu založenou na pasivních prvcích. Infrastrukturu rozumíme komponenty umístěné mezi rozvaděčem operátora (OLT) – Optical Line Termination a účastnickým zařízením (ONU) – Optical Network Unit. Jednotky OLT a ONU jsou aktivní zařízení.



Obrázek 1.5: *Passive Optical Network*

V převážné většině PON sítí se pro přenos dat využívá jedno optické vlákno. Optická síť tvoří stromovou strukturu. Koncoví uživatelé jsou připojeni do centrálního uzlu pomocí optických Splitterů, které energii přiváděného signálu rozdělují na určitý počet směrů. Typický Splitter rozděljuje jedno vlákno na 16, 32 nebo 64 vláken (výjimečně 128). Díky tomuto zařízení, přichází ke všem uživatelům stejný signál. Zařízení na straně uživatele signál filtruje a nepotřebná data zahazuje. Aby se odposlouchávání dat alespoň částečně zabránilo, byla zavedena metoda šifrování přenášených dat mezi oběma stranami. Pro oba směry se používá systém AES (Advanced Encryption Standard), který šifruje uživatelská data. Záhlaví rámců se tímto způsobem nijak neošetřuje.



Obrázek 1.6: WDM-PON

Z důvodu vyšší bezpečnosti je možné použít tzv. WDM-PON, který používá pro každého uživatele jiné vlnové délky světla. Pomocí speciálních filtrů s bragovskou mřížkou (FBG) se nežádoucí vlnové délky vyváží z vlákna a ke koncovému uživateli nedorazí. Tato varianta je příliš finančně nákladná, proto se v běžných distribučních sítích nepoužívá.

Existuje několik variant PON. Mezi ty starší patří APON, který využívá ATM (Asynchronous Transfer Mode) pro dálkové vysílání paketu. Vzhledem k tomu, že se ATM již nepoužívá, bylo nahrazeno širokopásmovým BPON (Broadband Passive Optical Network). BPON disponovalo rychlostí 622 Mbit/s Downstream a 155 Mbit/s Upstream.

Odstupem času i BPON zastaralo a bylo vytlačeno GPON nebo Gigabit PON. Tento standard poskytuje rychlost 2,488 Gbit/s pro Downstream a 1,244 Gbit/s Upstream. Vzhledem k tomu, že na jednom optickém vlákne provozujeme více jak jednoho uživatele, je třeba nějakým způsobem oddělit jejich provoz. V této fázi se obě technologie (GPON a EPON) liší. GPON využívá k rozdělení šířky pásma TDMA (Time Division Multiple Access). Každému uživateli je tak přidělen určitý časový okamžik pro vysílání.

EPON využívá optickou síť velmi podobně jako GPON. Také využívá dvě respektive tři vlnové délky. Laser na vlnové délce (λ) 1490nm pro Downstream, 1310nm pro Upstream a v případě distribuce televize i 1550nm. EPON je v rychlosti pomalejší. Disponuje v obou směrech rychlostí 1,25 Gbit/s. EPON je s ostatními Ethernet normami plně kompatibilní. Proto není zapotřebí konverze nebo zapouzdření. EPON na rozdíl od Ethernetu nepoužívá přístupovou metodu CSMA/CD.

Tabulka 1.3: *Srovnání GPON a EPON*

Varianta PON	GPON	EPON
Norma	ITU-T G.984	IEEE 802.3ah
Přenosová rychlost – Downstream	2,488 Gbit/s	1,25 Gbit/s
Přenosová rychlost – Upstream	1,244 Gbit/s	1,25 Gbit/s
Vlnová délka – Downstream	1490 nm	1490 nm
Vlnová délka - Upstream	1310 nm	1310 nm
Vlnová délka – Video	1550 nm	1550 nm
Protokol 2. vrstvy	ATM, GEM	Ethernet

1.3 Bezdrátové sítě

Lokální bezdrátové sítě neboli WLAN (Wireless Local Area Network) je označení pro standard 802.11. Prvotní záměr WLAN byl připojit mobilní stanice do lokální nebo vnitropodnikové sítě. Bezdrátové připojení se stalo velmi oblíbeným a vyhledávaným připojením do celosvětové sítě Internet. Díky nízkým pořizovacím nákladům na infrastrukturu je velmi snadné vybudovat bezdrátovou přístupovou síť, prakticky kdekoli. Bezdrátové připojení (tzv. WiFi) je dnes nedílnou součástí trhu v České republice a tvoří velkou konkurenční složku.

Výhody bezdrátových sítí jsou:

- Vysoká přenosová rychlost, která u standardu 802.11ac dosahuje 100 Mbit/s.
- Nízké zpoždění, řádově ms (1 – 10ms) na bezdrátový skok.
- Nepotřebují metalické či jiné vedení.
- Neustále se zvyšující kvalita bezdrátových prvků (AP).

Nevýhody bezdrátových sítí jsou:

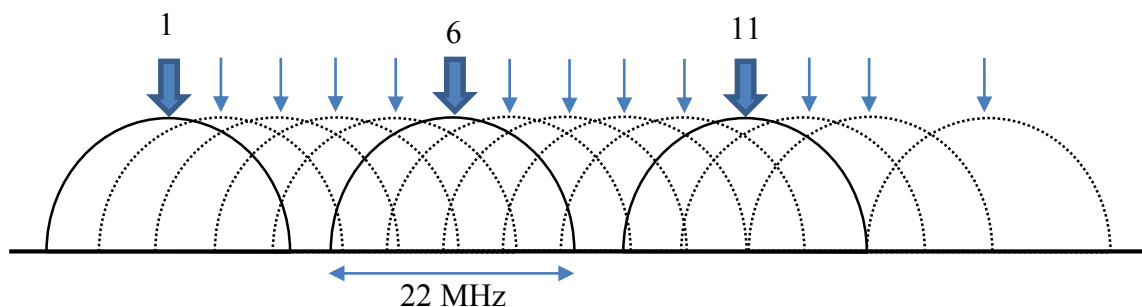
- Náchylnost na rušení jinými bezdrátovými sítěmi.
- Bezpečnost přenášených dat, data přenášená éterem může útočník odposlechnout a dešifrovat.

Nejznámější z bezdrátových sítí, která se běžně používá, je síť WLAN. Tato bezdrátová síť se řídí standardem 802.11, který obsahuje její verze.

1.3.1 WLAN 802.11

IEEE 802.11 je standard lokálních bezdrátových sítí WLAN (Wireless Local Area Network). Tento standard je doplněn o další vylepšení, které jsou popisovány písmeny. Mezi nejznámější patří standard 802.11b a 802.11g. Všechny standardy využívají pro posílání rádiového signálu stejný protokol, ale různé modulace.

- IEEE 802.11b je popsán jako standart, který pro přenos využívá frekvenčního pásma 2,4 GHz. Přenosová rychlost byla u standardu 802.11b navýšena na 11 Mbit/s, v porovnání s čistým standardem 802.11, který disponoval přenosovou rychlostí 2 Mbit/s. Frekvenční pásmo sdílí WiFi společně s bezdrátovými telefony, Bluetooth a jinými zařízeními, které pracují na stejné frekvenci. Díky koexistenci na společném médiu je toto pásmo silně rušeno. Navíc se kanály vzájemně ovlivňují, jelikož se frekvenčně překrývají. Na obrázku 1.7 jsou zobrazeny kanály, které se u standardu 802.11b,g využívají k přenosu dat. Ve skutečnosti existují pouze tři kanály, které se navzájem neovlivňují. Jsou to kanály 1, 6 a 11.



Obrázek 1.7: Překrývání kanálů 802.11b,g

- IEEE 802.11g je rozšířením standardu 802.11 b, se kterým je zpětně kompatibilní. Využívá stejného frekvenčního pásma a komunikačních kanálů. Jeho rychlost byla navýšena na 54 Mbit/s, které v reálné implementaci odpovídají 25 Mbit/s. Vyšší přenosové rychlosti se dosáhlo změnou modulace. Využívá se zde OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulace pro rychlosti 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 a 54 Mbit/s.
- IEEE 802.11a je standard pro provozování WiFi ve frekvenční oblasti 5 GHz. Díky vyšší pracovní frekvenci je mnohem méně náchylné na rušení jiných zařízení. Bezesporu největší výhodou je frekvenční rozložení kanálů ve spektru. Kanály se nově nepřekrývají a byly rozděleny na tzv. „Indoor“ a „Outdoor“. Hovoříme-li o kanálech Indoor, pohybujeme se ve frekvenčním rozmezí 5180 až 5320 MHz, pokud o kanálech Outdoor, 5500 až 5700 MHz (v Evropě). Outdoorové kanály mohou vysílat až do

výkonu 500 mW, oproti Indoor 100 – 200 mW. Přenosová rychlost a použitá modulace se shoduje se standardem 802.11g, přičemž spolu nejsou kompatibilní.

- IEEE 802.11n je dalším vylepšením standardu 802.11, které si klade za cíl upravit fyzickou vrstvu za účelem navýšení přenosové rychlosti. Aby bylo možné hovořit o standardu 802.11n, musí teoretická přenosová rychlost dosahovat minimálně 100 Mbit/s. Zvýšení přenosové rychlosti se dosahuje pomocí technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output), která se provozuje v minimální konfiguraci 2×2 nebo až 4×4 . To znamená, že se přenos realizuje na více než jednom vysílači a jednom přijímači. Reálná přenosová rychlost je 200 Mbit/s.
- IEEE 802.11ac je v současnosti nejrychlejší reálnou bezdrátovou technologií standardu 802.11. Standard se dočkal velkého počtu změn. Šířka pásma jednoho kanálu je povinných 80MHz, v porovnání s 20MHz u standardu 802.11n. Využívá modulaci 256-QAM (Quadrature amplitude modulation). Frekvenční pásmo zůstalo stejné jako u standardu 802.11a, 5 GHz. Využívá se zde MIMO až 8×8 , teoretická přenosová rychlost činí až 6,77 Gbit/s.

Tabulka 1.4: Srovnání standardů 802.11

Standard	Rok uvolnění	Pásmo [GHz]	Maximální rychlost [Mbit/s]	Modulace
IEEE 802.11	1997	2,4	2	DSSS, FHSS
IEEE 802.11b	1999	2,4	11	DSSS
IEEE 802.11g	2003	2,4	54	OFDM
IEEE 802.11a	1999	5	54	OFDM
IEEE 802.11n	2009	2,4 nebo 5	600	MIMO, OFDM
IEEE 802.11ac	2013	5	6770	256-QAM

1.3.2 WiMAX 802.16

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) je standard definovaný jako IEEE 802.16. Standard byl vytvořen pro bezdrátovou distribuci dat a venkovní sítě jako doplnění standardu IEEE 802.11, který byl původně určen výhradně vnitřním sítím. První verze standardu IEEE 802.16 byla definována v roce 2002. Pro tuto verzi bylo nutné zaručit přímou viditelnost mezi základnovou stanicí a účastnickým zařízením tzv. LOS (Line Of Sight). Pracovní frekvence se pohybovala v pásmu 10 až 66 GHz (licencované pásmo). Přenosová rychlost činila 134 Mbit/s.

- WiMAX 802.16a je standard definován v roce 2003. Využíval frekvenční pásmo 2 až 11 GHz (licenční a bezlicenční pásmo). Přesun do nižšího frekvenčního pásma přinesl výhodu v licencování, které nebylo za potřebí. Vzhledem k používané modulaci OFDM v tomto pásmu, není nutná přímá viditelnost mezi základnovou stanicí a účastnickým zařízením tzv. NLOS (Non Line Of Sight). Změna s sebou přinesla i nevýhodu v podobě nižší přenosové rychlosti, která se oproti čistému standardu IEEE 802.16, klesla na poloviční rychlost 70 Mbit/s.
- WiMAX 802.16c/d je standard zveřejněný ve stejném roce (2003) jako 802.16a. Hovoří se v něm o kompatibilitě s tím, že zavádí systémové profily jednotlivých zařízení, v nichž jsou obsaženy funkce a vlastnosti umožňující základní testování.
- WiMAX 802.16e je rozšíření standardu IEEE 802.16 v oblasti mobility a kvality služeb QoS (Quality of Service). Současně se začíná hovořit o technologii MIMO (Multiple Input Multiple Output), která má za úkol zajistit kvalitu pro NLOS (Non Line Of Sight) provoz. Zavedení služby prioritního provozu QoS (Quality of Service) s 5 třídami, které zaručí kvalitu datových služeb.

2 Metody hodnocení kvality řeči

Posuzování kvality řeči je velmi obtížná oblast telekomunikací. Vzhledem k tomu, že každý člověk vnímá kvalitu jinak, je nutné k věrohodnosti kvality použít velký počet posluchačů. Posuzovaná kvalita může být ovlivněna i psychickým stavem hodnotitele. Nakonec je nutné i takto získané výsledky prověřit pomocí statistických modelů, aby se odstranila odlehlá pozorování apod. Abychom se vyvarovali chybám v subjektivním posuzování kvality řeči, zavedli jsme pojem objektivního posuzování kvality. Tyto dvě metody (subjektivní a objektivní) jsou základní metody pro hodnocení kvality řeči v telekomunikacích. Ve skutečnosti je posuzování kvality řeči velmi časově a tím i finančně nákladná záležitost a proto je v mnoha případech u poskytovatelů služeb opomíjena.

2.1 Subjektivní metoda

V případě posuzování kvality pomocí subjektivní metody, se využívá více jak jednoho posluchače. Často se tvoří skupiny posluchačů, kteří obdrží formulář, na základě kterého posuzují kvalitu poslouchané řeči. Tento formulář byl vytvořen na základě standardu ITU-T P.82. Vyplněné formuláře se musejí dále zpracovat. Je důležité na ně použít statistické modely, například pro ověření odlehlých pozorování, které by nám mohly výsledek zkreslit.

Pro posuzování kvality řeči máme k dispozici dvě metody:

- Poslechová LQ (Listening Quality).
- Konverzační CQ (Conversational Quality).

Z hlediska věrohodnosti je konverzační metoda nejúčinnější z testů. Reálně totiž simuluje skutečnou konverzaci účastníků. Zároveň se jedná o časově a finančně nejnáročnější test kvality. Poslechová metoda využívá jen jednoho posuzovatele a komunikace přes médium neprobíhá.

2.1.1 Konverzační metoda

Při aplikování této metody je nutné dodržovat zásady správného vedení testu, stejně tak i zvolit vhodné podmínky a vybrat testovací subjekty. Tyto zásady jsou popsány ve standardu ITU-T P.800. [7] Zejména je zde u konverzačních testů zdůrazněno použití dvou speciálních místností, pro každý testovací subjekt jedna, které musejí splňovat několik parametrů.

Nejdůležitější parametry místností:

- Objem místnosti nesmí být menší než 30 m³.
- Šum v místnosti musí být potlačen na minimum.

Testovací subjekty spolu vedou rozhovor podle předepsaných zásad a pracovník v řídicí místnosti mění podmínky.

2.1.2 Poslechová metoda

Poslechová metoda posuzování kvality řeči není stejně realistická jako metoda konverzační. Poslechové metody mají nižší kritéria pro splnění posuzování kvality řeči. Je nutné dodržovat jiné parametry, které mohou ovlivnit výsledky testů.

Těmito parametry jsou:

- Nahrávací prostředí.
- Nahrávací systém.
- Řečový materiál.
- Mluvčí.
- Nahrávací procedura.
- Poslechové prostředí.
- Posluchači.
- Poslechový systém.

2.1.3 Stupnice hodnocení

Stupnice hodnocení slouží k zařazení posuzovaného vzorku do kategorie, která reprezentuje jeho kvalitu. Proto byla vytvořena stupnice MOS (Mean Opinion Scores), která je členěna do 5 kategorií. Proces hodnocení probíhá tak, že se testovacímu subjektu nejprve přehrají záznamy s dobrou, střední a špatnou kvalitou. Po této fázi se posluchači přehrávají nahrávky a ten je zařazuje do kategorií podle svého uvážení.

Tabulka 2.1: *Stupnice MOS dle standardu ITU-T*

Hodnocení MOS	Úroveň kvality	Rušení
5	Vynikající	Neznatelné
4	Dobrá	Rozpoznatelné, neobtěžující
3	Průměrná	Rozpoznatelné, mírně obtěžující
2	Nízká	Obtěžující, vynutí úsilí porozumět
1	Špatná	Velmi obtěžující, řeč nesrozumitelná

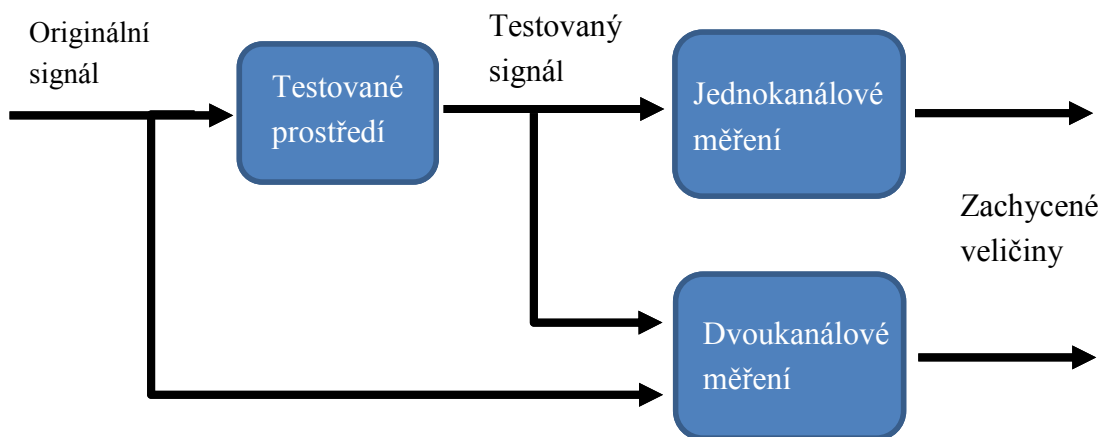
2.2 Objektivní metoda

Objektivní metoda nepoužívá k posuzování kvality vzorků řeči lidských subjektů. Díky tomu se snížily finanční náklady testů na minimum. Při této metodě se využívají k testování matematické modely a algoritmy. Cílem této metody je získat co nejpřesnější hodnotu MOS, podobně jako u subjektivních metod.

Abychom získali objektivní výsledky, musíme použít jedné ze dvou metod:

- Jednokanálové měření (Non-intrusive metod).
- Dvoukanálové měření (Intrusive metod).

Hlavním rozdílem mezi těmito metodami je začlenění degradovaných/poškozených vzorků do jejich výpočtů.



Obrázek 2.1: *Porovnání objektivních metod*

2.2.1 Jednokanálové měření (Non-intrusive metod)

Jednokanálová metoda využívá při své analýze pouze signál, který prošel přes testované prostředí. Vzhledem k tomu, že se k analýze využívá jen testovaného signálu, je tento systém náročnější na složitost výpočetních modelů a získaný výsledek se pouze odhaduje. Tento výsledek nese označení MOS-LQE. Díky tomu, že pro získání výsledku nepotřebujeme originální signál, jsme schopni tuto metodu implementovat do reálného provozu a monitorovat tak kvalitu během hovoru. [4]

Jednokanálové výpočetní algoritmy:

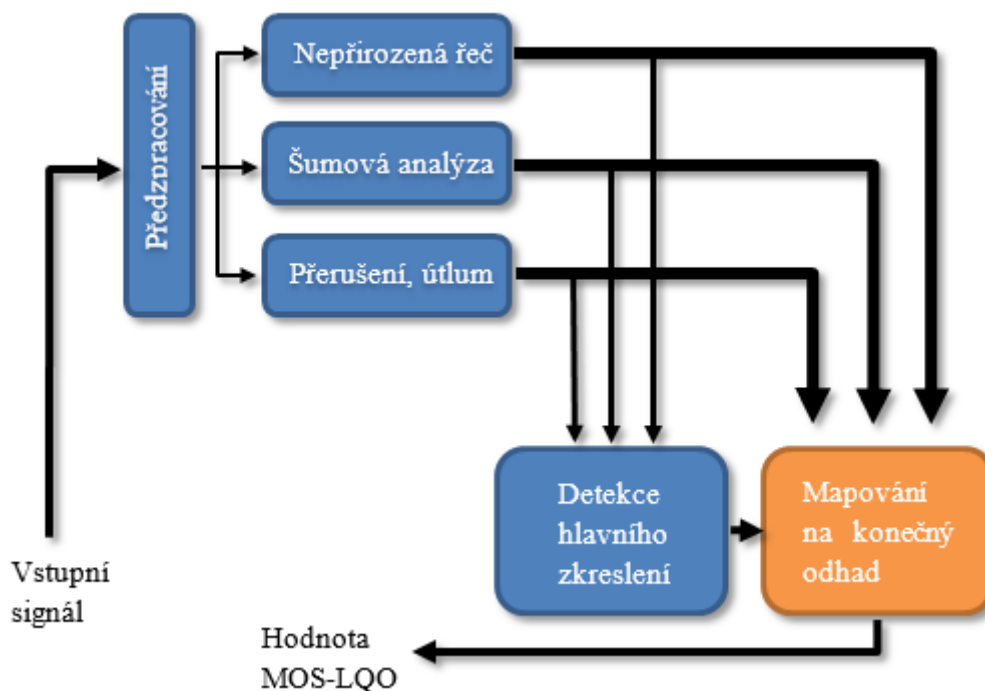
- 3SQM.
- INDM.
- CCL.

2.2.1.1 3SQM

Algoritmus 3SQM neboli Single Sided Speech Quality Measure je nejpoužívanějším algoritmem jednokanálových měření. Jak bylo již předesláno, tento algoritmus nevyžaduje pro svůj výpočet vstupní nezkreslený signál. Pracuje pouze se signálem, který získá v reálném čase z probíhající komunikace. Díky tomu je možné tuto metodu použít v okamžiku probíhajícího hovoru a hodnotit tak jeho kvalitu. Pro svůj výpočet využívá hodnocení třech typů zkreslení:

- Nepřirozená řeč – Probíhá detekce zkreslení hlasu, tzv. "robotický hlas", tento jev bývá způsoben omezenou šířkou pásma

- Šumová analýza – V této části testování probíhá měření odstupů signálu od šumu SNR (Signal to Noise Ratio) a jeho výsledný vliv na kvalitu signálu.
- Přerušování a útlumy – Detekují se výpadky spojení. Zejména detekce chybějících paketů, které mohou být zahozeny během cesty různými síťovými mechanismy nebo rozpadem spojení na linkové vrstvě.



Obrázek 2.2: Vnitřní struktura algoritmu 3SQM [5]

2.2.2 Dvoukanálové měření (Intrusive metod)

Dvoukanálová metoda využívá ke své analýze signál původní a signál, který prošel přes testované prostředí. Pomocí vhodných algoritmů se oba signály porovnají a vyhodnotí. Vzhledem k tomu, že pro analýzu potřebujeme signál původní i testovaný, je implementace do systémů, které pracují v reálném čase vyloučena. Použité výpočetní algoritmy se snaží zachytit ty veličiny, které ovlivňují kvalitu přenášeného vzorku řeči. Zachycené veličiny se porovnají s veličinami nacházejícími se v původním vzorku. Po porovnání se vyhodnotí úbytek kvality.

Dvoukanálové výpočetní algoritmy:

- PAMS (Perceptual Analysis Measurement System).
- PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality).
- PSQM (Perceptual Speech Quality Measurement).

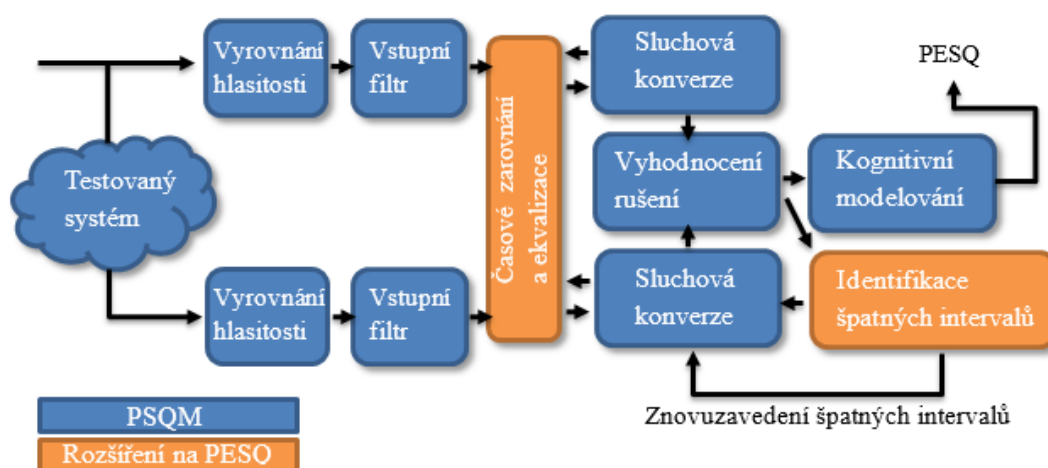
2.2.2.1 PAMS

Algoritmus PAMS (Perceptual Analysis Measurement System) je model, který porovnává signál původní a degradovaný testovaným vedením. Vstupní signály jsou vzorkovány do segmentů. Analýza probíhá na jednotlivých segmentech, nikoli na celém vzorku. Model PAMS využívá sluchový model, který kombinuje matematický popis vlastností lidského sluchu s technikou, která bere v úvahu chyby v přijatém signálu. Ve výsledku dojde k porovnání původního a přijatého testovacího signálu a určí na něm dva odhady MOS (Mean Opinion Score) na stupnici od 1 do 5. První číslo je za kvalitu poslechu a druhé za poslechové úsilí. Model PAMS byl vyvinut společností British Telecommunications v roce 1998.

2.2.2.2 PESQ

PESQ je zkratka pro Perceptual Evaluation of Speech Quality neboli Percepční hodnocení kvality řeči je standardizován v ITU-T P.862 [12]. V současné době je PESQ využíván pro objektivní testování kvality řeči výrobci telefonů, síťových poskytovatelů a operátorů po celém světě. Používání metody PESQ je podmíněno a vázáno licencí. Hlavním důvodem pro vytvoření nového standardu byl nástup VoIP služeb. Pro služby VoIP nebyly dosavadní metody standardu ITU-T P.861, který využívá zejména systém GSM, vyhovující. Největší komplikací pro nový standard bylo zpoždění mezi originálním a testovaným signálem, které nebylo konstantní. Tento problém je podstatou samotných směrovaných sítí IP. Jelikož pakety, v nichž jsou uloženy přenášené signály, se mohou šířit v různých cestách od zdroje k cíli. Prvním krokem k překonání tohoto problému byl vývoj PSQM+. S nástupem standardu ITU-T P.862 označovaným jako PESQ byly tyto problémy odstraněny.

PESQ kombinuje psycho-akustické a kognitivní modely PSQM+ společně s časovým vyrovnáním algoritmu přejatého od PAMS, který je schopen zpracovávat různá zpoždění bez problémů. V současné době je PSQM a PESQM jedinné dva algoritmy, které jsou schopny pokrýt celou problematiku měření kvality řeči. Na obrázku 1.10 je blokově znázorněn algoritmus PESQ s novými bloky PSQM. [12]



Obrázek 2.3: Vnitřní struktura algoritmu PESQ [12]

2.2.2.3 **PSQM**

Tento výpočetní algoritmus je definován v doporučení ITU-T P.861 [9], který hodnotí hlasovou kvalitu ve frekvenční oblasti 300 – 3400 Hz a řečové kodeky. V minulosti byl tento algoritmus velmi často vyhledáván, nicméně ho v budoucnu nahradil algoritmus PESQ definován v ITU-T P.862. [10] PSQM používá matematické modely algoritmů pro analýzu originálního i testovaného signálu. Po provedení analýzy získáme hodnotu, která odpovídá míře snížení kvality přenášeného signálu. Stupnice má rozsah 0 (signál bez degradace) až 6,5 (signál s největší degradací). Hodnotu výsledku můžeme pro snadnější porovnání převést do stupnice MOS (Mean Opinion Score), která je definována v měřítku 1 až 5. Přičemž hodnota 1 odpovídá nejhorší kvalitě a 5 nejlepší kvalitě. [11]

2.2.2.4 **POLQA**

PILQA, neboli Perceptual Objective Listening Quality Assessment, je nejnovější výpočetní algoritmus definován v doporučení ITU-T P.863. Je velmi podobný algoritmu PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), který pro hodnocení používá jak původní tak i degradovaný signál. Tento nový algoritmus, zveřejněný v roce 2011 a rozšířen v roce 2014, může být použit pro analýzy hlasových signálů v HD kvalitě u 3G, 4G a LTE sítí.

Velkou změnou tohoto algoritmu je funkce práce ve dvou režimech:

- Narrowband.
- Superwideband.

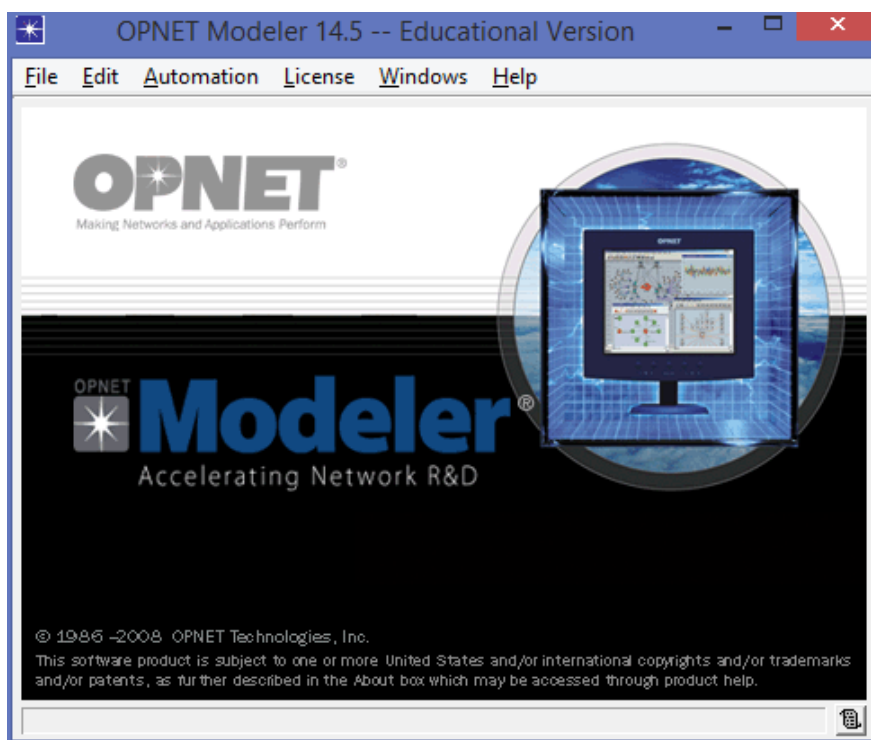
Narrowband pracuje ve frekvenční oblasti 300 až 3400 Hz (základní hovorové pásmo), výsledek MOS získaný z tohoto módu, by měl být podobný jako u algoritmu PESQ. Superwideband pracuje v rozšířeném pásmu, které je stanoveno od 50 do 14000 Hz. Toto pásmo je určeno pro vysoko kvalitní přenos hlasu tzv. HD Voice.

Základní rozdíl algoritmu POLQA a PESQ je patrný ihned při porovnání originálních vzorků. Algoritmus PESQ, který porovnává dva shodné, nezkreslené zvukové signály, vyhodnotí jejich kvalitu jako nejvyšší "MOS=5". Algoritmus POLQA při porovnávání signálů vyhodnocuje pomocí neintrusivní metody počáteční šum. Tento krok může způsobit, že porovnání dvou referenčních vzorků nebude dosahovat nejvyššího stupně hodnocení, ale výsledek bude ponížen o odhadovanou hodnotu na "MOS<5".

3 Vytvoření simulačního modelu pro přístupové sítě s hodnocením MOS

Pro vytvoření simulačního modelu přístupových sítí jsem se spolehl na nabitě zkušenosti ze zapsaného předmětu Modelování sítí, který jsem absolvoval na VŠB TU Ostrava. V tomto předmětu jsme se zaměřovali na modelování sítí a analýze s nimi spojenou. V předmětu jsme si vyzkoušeli několik programů, z nichž mě nejvíce oslovil program OPNET Modeler 14.5 (Optimum Network Performance), vyvinutý americkou společností OPNET Technologies.

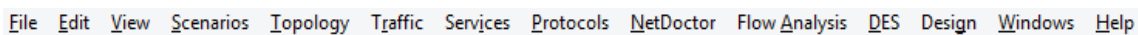
Program slouží jako vhodné prostředí pro návrh, simulaci a analýzu komunikačních sítí. Program je schopen modelovat malé, ale i rozsáhlé sítě. Každý prvek je možné definovat velmi přesně, dle požadavků uživatele. Velkou výhodou tohoto prostředí je velmi snadná implementace předem vytvořených sítí, které jsou součástí instalovaného balíku. Velmi dobře je zpracovaná i nápověda programu, kde uživatel nalezne popis jednotlivých funkčních prvků, ale i kompletní dokumentaci k předem vytvořeným tutoriálům.



Obrázek 3.1: Úvodní obrazovka programu OPNET Modeler 14.5

Přístup k nadefinovaným schémátům je lehce složitější. Uvítal bych nějakého zjednodušeného průvodce. Vzhledem k tomu, že tyto modely mají sloužit k seznámení uživatele a programu, je prvotní pohled na cestu k projektům zdoluhavý. V mém případě vypadá takto:

File -> Open -> C:\OPENT\14.5.A\models\tutorial_ref\modeler



Obrázek 3.2: Hlavní nabídka programu

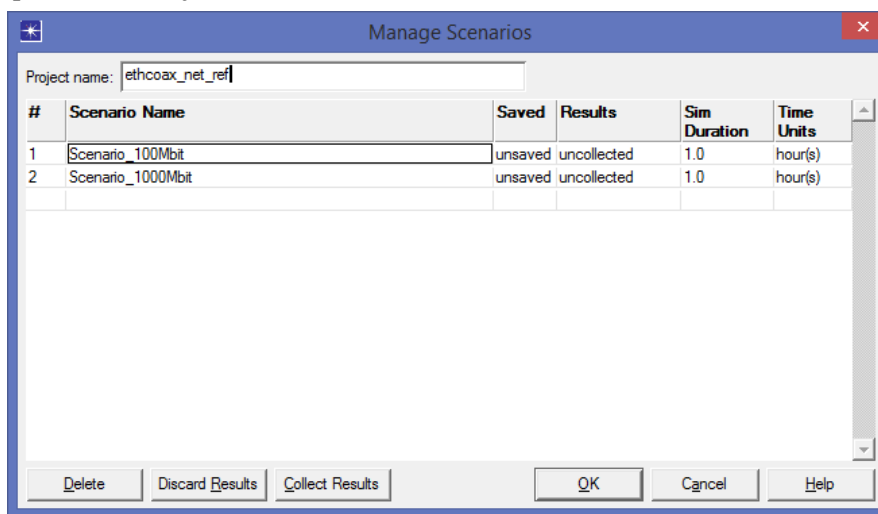


Obrázek 3.3: Nabídka tlačítek pro rychlé spuštění

Užitečnou funkcí je v aplikaci možnost použití scénářů. Pro jednu síť, kterou si vymodelujeme, je možné nastavit tolik kopií, kolik je potřeba a v každé z nich nastavit parametry odlišně. Po zkompilování a následné simulaci je možné si výsledky promítnout do jednoho grafu a vyhodnotit průběh testu. Vyvolání nabídky scénářů se provede v hlavním menu programu:

Scenarios -> Manage Scenarios ...

Okno pro správu scénářů je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Správce scénářů

Velmi snadné je i přepínání mezi samotnými vytvořenými scénáři:

Scenarios -> Switch To Scenario

Program OPNET Modeler se skládá ze dvou základních částí:

- Grafický editor
- Editor modulů

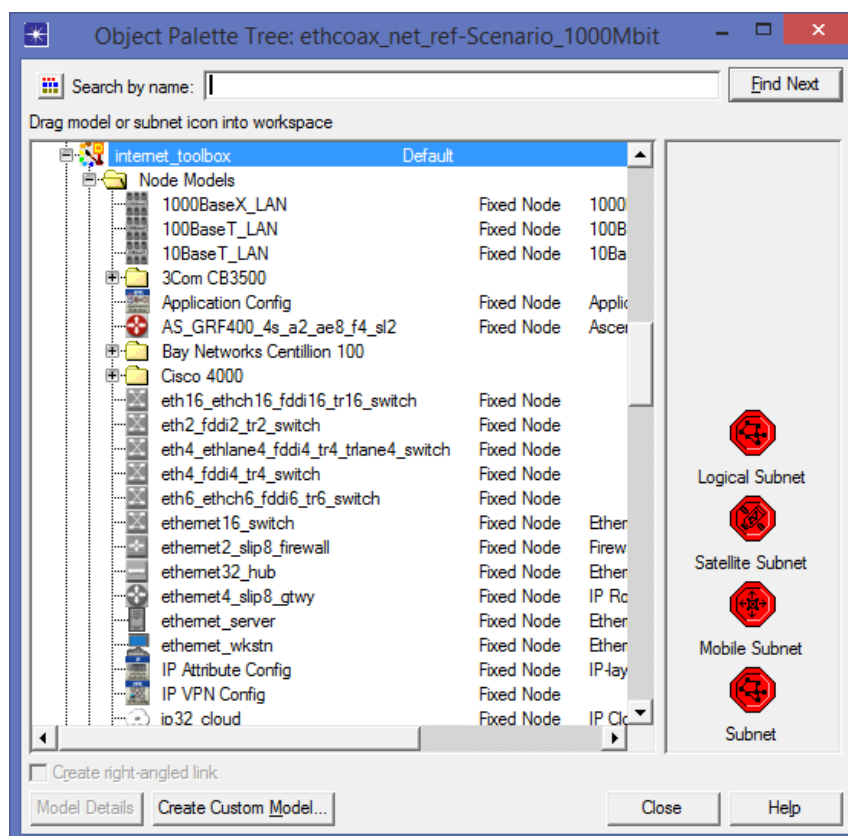
Grafický editor tvoří mapa/topologie sítě a přiřazené konfigurační komponenty, které ovlivňují chování modelované sítě.

Komponenty sítě se – směrovače, přepínače, rozbočovače, modemy, servery apod.

Konfigurační komponenty – aplikační, profilové, QoS apod.

Všechny tyto prvky se skrývají pod jednotnou paletou objektů, která se jmenuje Object Palette. Je možné ji vyvolat z hlavní nabídky programu:

Topology -> Open Object Palette

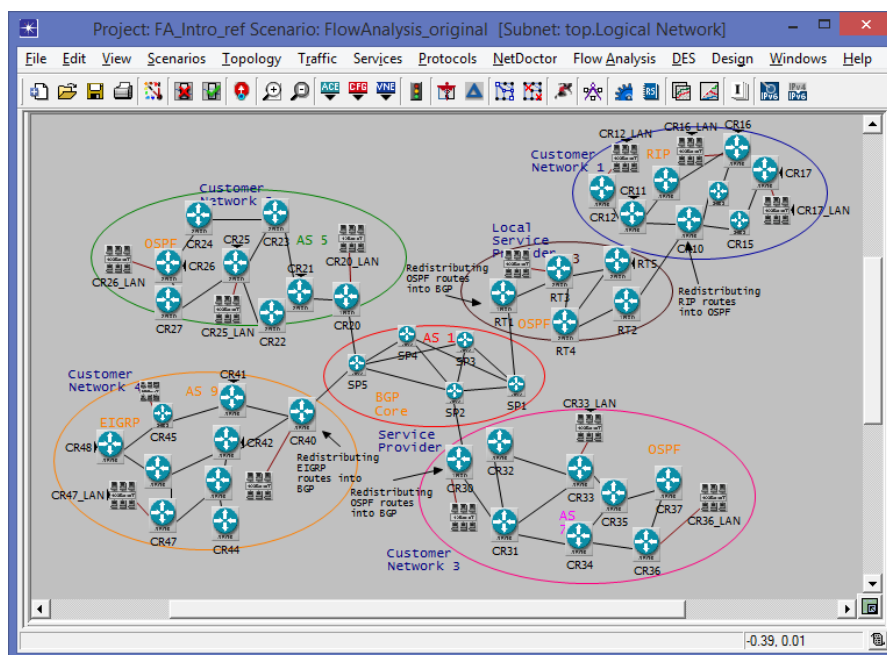


Obrázek 3.5: Okno s paletou komponent

V tomto okně se nacházejí všechny aktivní i pasivní části, které slouží k modelování sítě. Jsou uspořádány do přehledné stromové struktury, ve které se uživatel velmi snadno zorientuje. V případě zkušenějšího uživatele je k dispozici vyhledávací pole.

Prvky se z okna palety do základního okna grafického editoru přemísťují pomocí funkce Drag and Drop neboli táhni a posuň. Aplikace umožňuje i několikanásobné vložení jednoho prvku. Jednoduše klikáte levým tlačítkem myši, tolikrát, kolik potřebujete stejných prvků v síti. Jednotlivé komponenty se poté propojí linkami intuitivním způsobem. Uživatel si vybere linku z nabídky, klikne levým tlačítkem myši na první objekt, táhne k druhému prvku, na který opět

klikne levým tlačítkem myši a síť se vytvoří. V některých případech jsou tyto kroky následovány dotazem o vytvoření rozhraní.



Obrázek 3.6: Topologie

Po dokončení návrhu sítě, který může vypadat podobně jako na obrázku 3.6, se můžeme pustit do simulace. Nejdříve je nutné nastavit sledované parametry, které se nám po simulaci vykreslí do grafů. Sledované parametry se nastavují v přehledném okně, které se vyvolá přes základní panel nabídky:

DES -> Choose Individual Statistics ...

V tomto okně, jehož položky jsou opět uspořádány do stromové struktury, si navolíme, které položky chceme sledovat při simulaci. Položky jsou rozděleny do tří základních skupin:

- Global Statistics.
- Node Statistics.
- Link Statistics.

Už podle názvů jednotlivých položek je jasné, které informace bude systém vyhodnocovat.

Po navolení sledovaných parametrů máme před sebou poslední krok. Spuštění simulačního procesu.

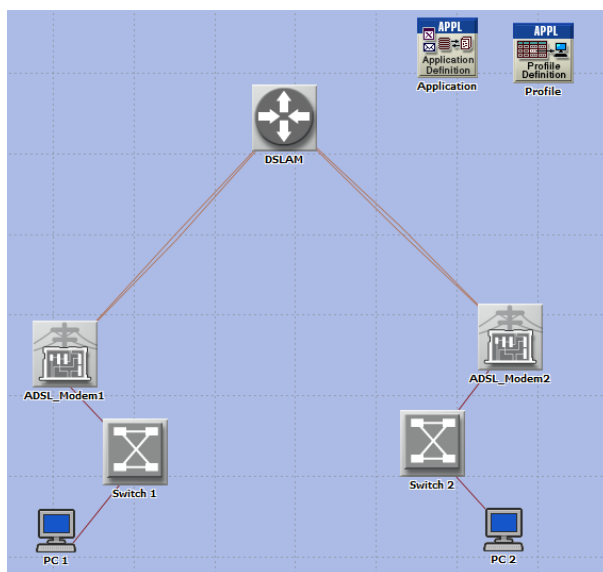
DES -> Configure/Run Descrete Event Simulation

Po dokončení simulace si vyvoláme zobrazení sledovaných parametrů.

DES -> Results -> View Results ...

3.1 Simulace ADSL

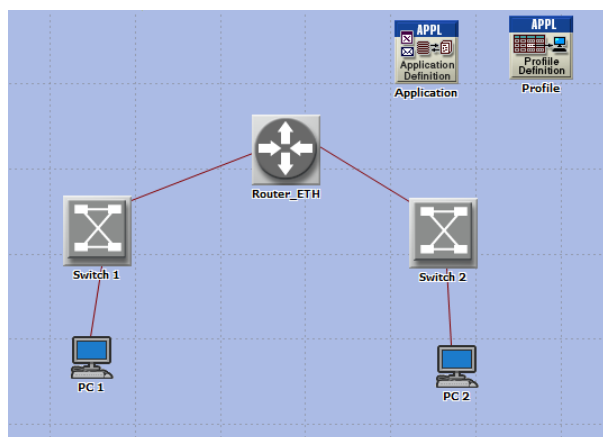
Základem xDSL sítě je router, který se nazývá DSLAM. K němu jsou připojeny xDSL modemy pomocí Upstream a Downstream linek. Důležité je v simulaci správně zložit směr pro Downstream, který je z DSLAMu k účastnickému modemu a Upstream od účastníka k DSLAMu. K modemům jsou prostřednictvím přepínačů (switch) připojeny klientské stanice, mezi kterými jsem simuloval provoz. Provozní parametry jsou definovány v ikoně „Application“, pomocí „Profile“ se jednotlivé aplikace jako jsou „FTP, http, Voice, Video apod.“ seskupovány do skupin. Tyto skupiny se později přidělují jednotlivým stanicím, které na základě těchto parametrů simulují datový provoz.



Obrázek 3.7: *Simulace ADSL*

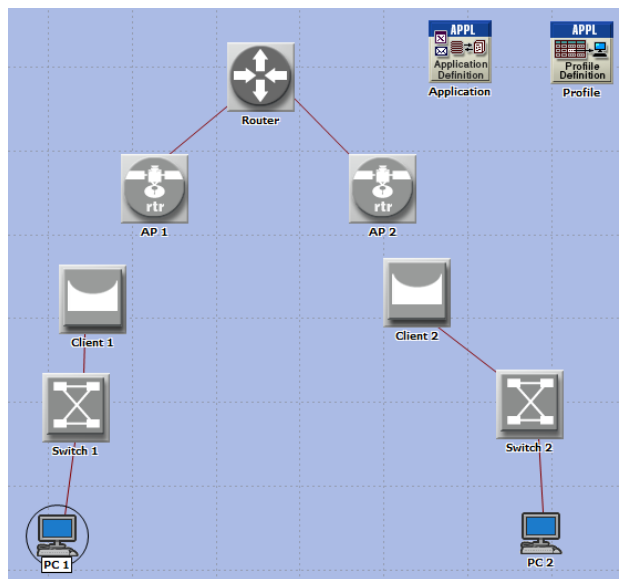
3.2 Simulace Ethernet

Schéma simulace sítě Ethernet je založen na jednom směrovači (router), ke kterému jsou prostřednictvím přepínačů (switch) připojeny účastnické stanice.



Obrázek 3.8: *Simulace Ethernet*

3.3 Simulace WiFi



Obrázek 3.9: *Simulace WiFi*

3.4 Závěr simulací

U všech simulovaných měření nedošlo k adekvátnímu výpočtu MOS, tato hodnota byla ve všech testovaných případech konstantní. MOS je zpravidla ovlivňována ztrátovostí, zpožděním a jitterem. Vzhledem k tomu, že hodnoty těchto parametrů nebyly konstantní, můžeme usuzovat chybnou interpretaci hodnoty MOS programem OPNET Modeler. Proto se v následující kapitole o experimentální verifikaci věnuji laboratorní simulaci přístupových sítí a objektivnímu hodnocení kvality přenášeného hlasu.

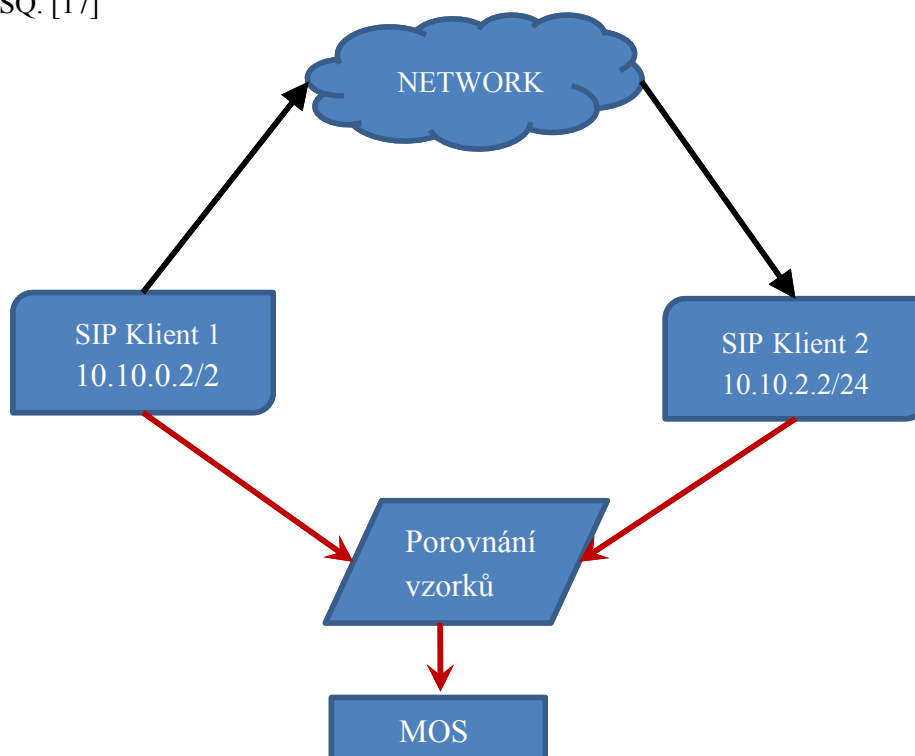
4 Experimentální verifikace modelu

V této kapitole se zaměřuji na experimentální část diplomové práce, ve které ověřuji simulace jednotlivých modelů přístupových sítí navrhovaných v programu OPNET Modeler. Celý experiment jsem rozdělil na dvě oblasti, laboratorní a reálnou. Obě oblasti experimentů využívají totožné prvky. Systém se skládá ze tří počítačů, na kterých je instalován operační systém Linux Debian 2.6.32-5-686 i686 (Squeeze).

Na začátku simulace je důležité zvolit správnou verzi jádra systému Linux, aby bylo možné simulovat prostředí sítě. Všechny verze od jádra 2.6.7 a novější obsahují Network Emulator (NETEM), jímž je možné ovlivňovat parametry jednotlivých síťových rozhraní počítače. Já měl k dispozici na starším (2011) CD nosiči systém Debian s jádrem 2.6.32 nesoucím označení Squeeze, v němž již byla služba dostupná.

Pro přenos audio vzorků jsem využíval software Asterisk, instalován na počítačích označených na obrázku č. 4.1 jako „SIP Klient1“ a „SIP Klient2“. Audio vzorky jsem měl k dispozici od svého kolegy Bc. Radima Feču, který je používal ve své bakalářské práci. [15] Celkem 100 audionahrávek reprezentovaných 25 vzorky s mužským a ženským hlasem v českém a anglickém jazyce.

Vyhodnocení kvality přenášených vzorků jsem prováděl na počítači NETEM. Na tento počítač jsem si z internetových stránek ITU.T stáhl program pro hodnocení kvality audio vzorků P.86 PESQ. [17]



Obrázek 4.1: Topologické schéma systému

4.1 Laboratorní verifikace

Systém byl navržen tak, aby komunikace probíhala mezi počítači „SIP Klient1“ a „SIP Klient2“ přes prostředí ovládané NETEM (Network Emulator), kterým se ovlivňují parametry Ethernetových rozhraní.

Počítač označený jako NETEM (reprezentován obličkem s názvem „Network“ na obrázku č. 4.1) tvoří základní část celé sítě. Je osazen třemi síťovými Ethernet kartami.

Eth0 - 10.10.0.1/24

Eth1 - 192.168.99.110/24

Eth2 - 10.10.2.1/24

Ethernet 1 je rozhraní, které slouží pro konfiguraci a zároveň jako gateway do Internetu pro instalaci balíčků ze síťových serverů.

Ethernet 0 a 2 jsou rozhraní pro připojení klientských počítačů, na kterých je spuštěna služba softwaru Asterisk, pro přenos a zachycení vzorků simulovaným prostředím NETEM.

V balíčku NETEM je možné nastavovat parametry jako je zpoždění (delay), ztrátovost (loss), duplicitu paketů (duplication) apod. [16] Nevýhodou tohoto řešení, je možnost nastavit vždy jen jeden parametr na síťové rozhraní. Není možné nastavit ztrátovost a zpoždění na jednu linku. Tyto parametry se musí rozdělovat vždy na jednotlivá rozhraní.

4.1.1 Příkazy NETEM

Výpis již nastavených pravidel.

```
tc qdisc show
```

Nastavení zpoždění.

```
tc qdisc add dev eth0 root netem delay 100ms
```

Změna zpoždění (ze 100 ms na 10 ms).

```
tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 10ms
```

Změna zpoždění 100 ms +/- 10 ms (kolísá).

```
tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 10ms 25%
```

Změna zpoždění z uniformního na distribuční.

```
tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 20ms  
distribution normal
```

Nastavení ztrátovosti (na 0,1 %).

```
tc qdisc add dev eth0 root netem loss 0.1%
```

Nastavení ztrátovosti (na 0,1 % + kolicání).

```
tc qdisc add dev eth0 root netem loss 0.3% 25%
```

Nastavení duplicity paketů (na 1 %).

```
tc qdisc add dev eth0 root netem duplicate 1%
```

Podstrkávání neplatných paketů (posunutí v paketu o jeden bit).

```
tc qdisc add dev eth0 root netem corrupt 0.1%
```

Nastavení změny pořadí, každý 5. (10., 15., ...) odejde ihned a každý druhý bude zpožděn o 10ms.

```
tc qdisc change dev eth0 root netem gap 5 delay 10ms
```

Nastavení pro 25 % paketů (s korelací 50 %), které projdou okamžitě, ostatní budou zpožděny o 10 ms.

```
tc qdisc change dev eth0 root netem delay 10ms reorder 25% 50%
```

4.1.2 Parametry přístupových sítí

Pro získání nejvíce reálných hodnot jsem pozoroval všechny dostupné přístupové sítě, které slouží jako přístupové médium k Internetu. Získal jsem základní parametry těchto linek, které jsem později nastavoval do NETEM. Pro získání těchto parametrů jsem použil 172000 dotazů „Ping“ z prostředí Linux na nix.cz v IPv4 síti. Vzhledem ke skutečnosti, že jsou požadavky na odezvu generovány každou vteřinu, probíhal test pro všechny sítě více než 47 hodin.

Tabulka 4.1: *Parametry přístupových sítí*

Typ rozhraní	Zpoždění (min.) [ms]	Zpoždění (max.) [ms]	Zpoždění (prům.) [ms]	Ztrátovost [%]
WiFi	7	2007	11	0,3
WiMAX	1	128	8,2	0,00
VDSL	24	1107	27	0,05
ADSL	17	348	27	0,06
Ethernet	0,2	0,6	0,3	0,00

Při simulaci pomocí NETEM jsem vycházel z hodnot zmíněných z tabulce 4.1. Zejména z průměrných hodnot zpoždění a ztrátovosti. Z tabulky můžeme snadno vyčíst, nejvyšší míru ztrátovosti u technologie WiFi, tato hodnota mě nijak nepřekvapila. Zajímavých hodnot jsme docílili u technologií ADSL a VDSL. Zpoždění u obou těchto technologií je stejné a ztrátovost u VDSL o jednu setinu nižší. Očekával jsem od vylepšené xDSL technologie lepší parametry.

4.1.3 Konfigurace Asterisk

Když jsem se zamýšlel, jakým způsobem přenést vzorky s audio nahrávkami přes simulovanou síť, našel jsem několik řešení. Téměř všechny byly zpoplatněny. Načež jsem si vzpomněl na jeden absolvovaný předmět s Asteriskem, který je OpenSource a ke všemu umí všechno, co potřebuji. Asterisk umožňuje vytvoření spojení mezi dvěma klienty, spuštění přehrávání vzorku a jeho následný záznam.

Jednotlivé stanice jsem nazval SIP Klient 1 a SIP Klient 2. Přiřadil jsem jim IP adresy z lokálního subnetu 10.0.0.0/8. Pro „SIP Klient1“ adresu 10.10.0.2/24 a pro „SIP Klient2“ adresu 10.10.2.2/24. Připojil jsem tyto stanice k počítači s aplikací NETEM do předem nastavených rozhraní tak, aby adresy spadaly do stejných podsítí, tedy: 10.10.0.1 ⇔ 10.10.0.2 a 10.10.2.1 ⇔ 10.10.2.2. Pro správnou funkci bylo nutné v počítači s NETEM nastavit forward mezi připojenými adresními rozsahy:

```
sudo sysctl -w net.ipv4.ip_forward=1
```

Samotná instalace Asterisku je velmi snadná:

```
apt-get install asterisk
```

Po instalaci stačilo jen nastavit správně oba Asterisky tak, aby spolu komunikovali. K tomuto postačí dva soubory, které se nachází v /etc/asterisk/ a jmenují se sip.conf a extensions.conf.

Výpis sip.conf z „SIP Klient 1“ vlevo a „SIP Klient 2“ vpravo:

[general]	[general]
port=5060	port=5060
transport=udp	transport=udp
udpbindingaddr=10.10.0.2	udpbindingaddr=10.10.2.2
disallow=all	disallow=all
allow=alaw	allow=alaw
[SIP_Klient1]	[SIP_Klient2]
host=10.10.2.2	host=10.10.0.2
type=friend	type=friend
secret=1234	secret=1234
defaultuser=SIP_Klient2	defaultuser=SIP_Klient1
qualify=yes	qualify=yes
context=phone	context=phone

Důležitými položkami jsou porty, které musí být nastaveny na stejné hodnoty v případě defaultního nastavení je port 5060, stejně jako transportní protokol je UDP. Položky [SIP_Klient1] a [SIP_Klient2] jsou SIP uživatelé a jejich konfigurace.

Zkrácený výpis extensions.conf „SIP Klient 1“:

```
[default]
[local]
exten=>200,1,Dial(SIP/ SIP_Klient1/200)
same=>n, Hangup()

exten=>100,1,Answer()
same=>n, Monitor(wav,M100)
same=>n, Playback(/home/student/czM/M100)
same=>n, Hangup()
. . .
```

Výpis extensions.conf „SIP Klient 2" vpravo:

```
[local]
exten=>200,1,Answer()
same=>n, Echo()
same=>n, Hangup()
```

V souboru extensions.conf „SIP Klienta1“ je nastaveno vytvoření spojení s uživatelem SIP_Klient1 a následné přehrávání a záznam vzorků. V druhém konfiguračním souboru je nastaveno vyzvednutí hovoru od prvního uživatele a zpětné vytočení. To znamená, že hovor jde od Klienta1 zpět ke Klientu1, kde se vytvoří záznam hovoru do výchozího úložiště, kde se ukládají originální i degradované/přenesené vzorky.

```
/var/spool/asterisk/monitor
```

Pro navázání spojení klientů je důležité spustit na obou počítačích službu Asterisk příkazem:

```
asterisk -r
```

Vzhledem k tomu, že jsme měnili konfiguraci v souborech sip.conf a extensions.conf, musíme tyto konfigurační soubory znovu načíst do Asterisku. Změnu konfigurace ústředny provedeme kombinací dvou příkazů.

```
sip reload
dialplan reload
```

Pro ověření navázání komunikace mezi ústřednami, napíšeme do příkazového řádku:

```
sip show peers
```

Po navázání komunikace se nám zobrazí v konzolovém okně něco podobného jako na obrázku č. 4.2.

```

10.10.0.2 - PuTTY
klient1*CLI> sip reload
[May 3 20:09:48] NOTICE[2329]: : Peer
'ast1' is now Reachable. (1ms / 2000ms)
klient1*CLI> sip show peers
Name/username      Host      Dyn Forcerpor
t ACL Port      Status
ast1/ast2          10.10.2.2  N
5060              OK (1 ms)
1 sip peers [Monitored: 1 online, 0 offline Unmonitored: 0 online, 0 offline]
klient1*CLI> ~~~

```

Obrázek 4.2: Výpis Asterisk -> sip show peers

V tento okamžik máme Asterisk nastaven k tomu, abychom mohli začít přenášet audio vzorky. Abychom nemuseli posílat jeden soubor po druhém, vytvoříme si skript, který za nás bude posílat soubory sám. Ten uložíme do /home jako soubor bez přípony, například RUN.

```

#!/bin/bash
for j in 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113
114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124
do
    echo "volam cislo $j"
    echo `asterisk -rx "originate local/$j@local extension
200@local"`
    sleep 15
done

```

Přihlásíme se opět do konzoly, ve které máme nastaveného SIP Klienta1 a nakopírované vzorky k přenosu. V mém případě mám nahrávky ve /home/student/czM/. Spustíme skript pomocí příkazu „sh RUN“ a pokud vše pracuje správně, uvidíme výpis obrazovky stejný jako na obrázku č. 4.3. Nyní máme soubory připraveny pro analýzu pomocí PESQ a AQuA.

```

10.10.0.2 - PuTTY
root@klient1:/home# sh run
volam cislo 100

volam cislo 101

volam cislo 102

volam cislo 103

volam cislo 104

volam cislo 105

^C
root@klient1:/home#

```

Obrázek 4.3: Výpis přenosu vzorků

4.1.4 Hodnocení pomocí PESQ

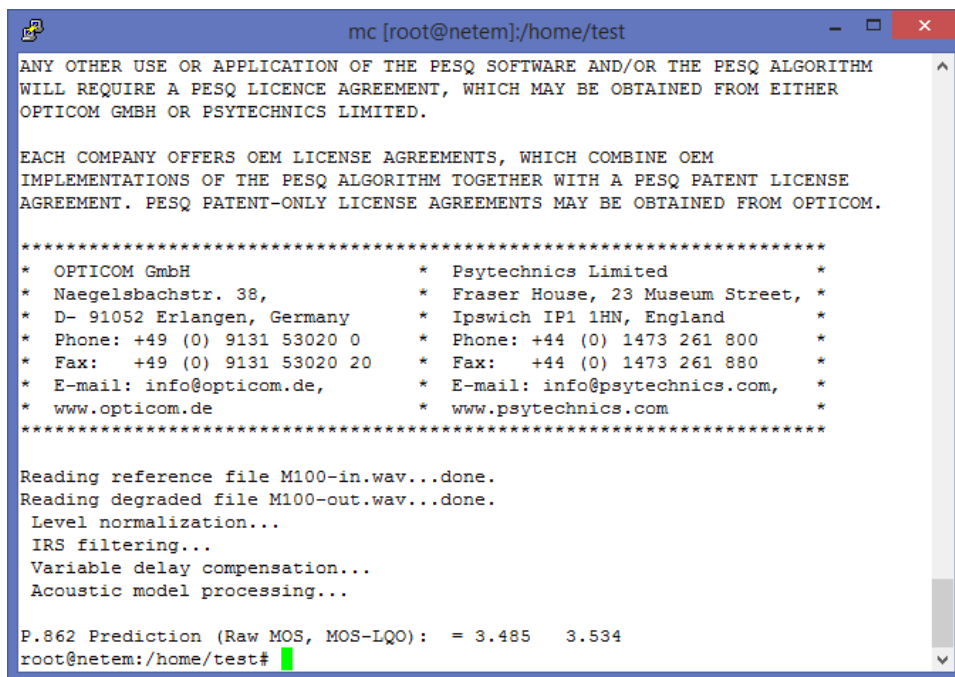
Po získání degradovaných vzorků se můžeme pustit do testování. K tomuto kroku použijeme volně dostupnou aplikaci ITU-T, kterou si stáhneme z webových stránek organizace. [17] K dispozici máme balík s aplikací a malou zásobu testovacích vzorků. Pomocí GNU kompilery vygenerujeme hodnotící nástroj ve formátu C++.

```
gcc -o PESQ *.c -lm
```

Po zkompilování se nám ve složce se zdrojovými kódy objeví soubor PESQ, který budeme využívat k analýze vzorků. Pro tento účel nám postačí jednoduchý příkaz:

```
./pesq +8000 Audio-in.wav Audio-out.wav
```

Soubor označen jako Audio-in.wav je původní soubor, který neprošel testovacím prostředím. Druhý soubor označen jako Audio-out.wav je testovaný soubor, který prošel sestaveným prostředím a je tedy degradovaný.



```
mc [root@netem]:/home/test
ANY OTHER USE OR APPLICATION OF THE PESQ SOFTWARE AND/OR THE PESQ ALGORITHM
WILL REQUIRE A PESQ LICENCE AGREEMENT, WHICH MAY BE OBTAINED FROM EITHER
OPTICOM GMBH OR PSYTECHNICS LIMITED.

EACH COMPANY OFFERS OEM LICENSE AGREEMENTS, WHICH COMBINE OEM
IMPLEMENTATIONS OF THE PESQ ALGORITHM TOGETHER WITH A PESQ PATENT LICENSE
AGREEMENT. PESQ PATENT-ONLY LICENSE AGREEMENTS MAY BE OBTAINED FROM OPTICOM.

*****
* OPTICOM GmbH                               * Psytechnics Limited *
* Naegelsbachstr. 38,                         * Fraser House, 23 Museum Street, *
* D- 91052 Erlangen, Germany                  * Ipswich IP1 1HN, England *
* Phone: +49 (0) 9131 53020 0                 * Phone: +44 (0) 1473 261 800 *
* Fax: +49 (0) 9131 53020 20                  * Fax: +44 (0) 1473 261 880 *
* E-mail: info@opticom.de,                   * E-mail: info@psytechnics.com, *
* www.opticom.de                             * www.psytechnics.com *
*****

Reading reference file M100-in.wav...done.
Reading degraded file M100-out.wav...done.
Level normalization...
IRS filtering...
Variable delay compensation...
Acoustic model processing...

P.862 Prediction (Raw MOS, MOS-LQO): = 3.485 3.534
root@netem:/home/test#
```

Obrázek 4.4: Výstup hodnocení modelu PESQ

Abychom si usnadnili práci a nemuseli testovat jeden soubor po druhém samostatně, vytvoříme si skript, který bude za nás testovat předem definované vzorky. Výsledky se zapisují do souboru pesq_result.txt ve stejné složce jako je spouštěcí soubor.

```
#!/bin/bash
for j in 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113
114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124
do
    /home/test/pesq +8000 M$j-in.wav M$j-out.wav
done
for i in 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113
114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124
do
    /home/test/pesq +8000 Z$i-in.wav Z$i-out.wav
done
```

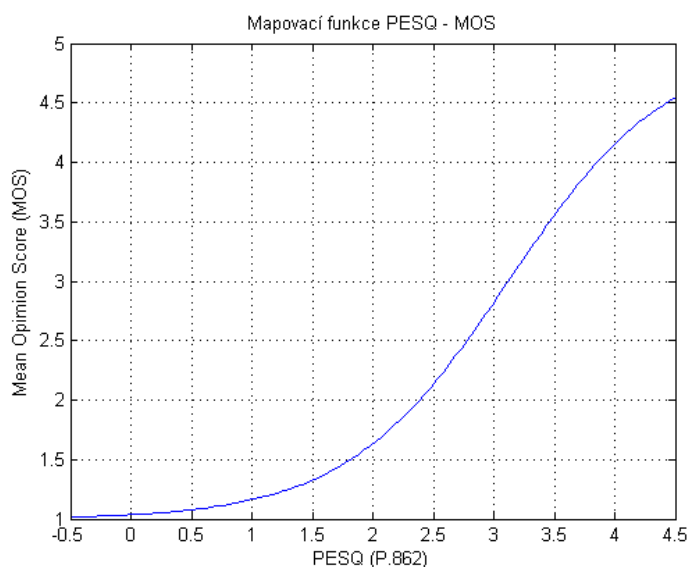

Výsledky jsou zapisovány do souboru pesq_result.txt. Ve výstupu modelu PESQ je několik hodnot nesoucí označení MOS. Jsou nimi PESQMOS a MOSLQO.

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	SAMPLE_FREQ	MODE
M100-in.wav	M100-out.wav	4.482	4.538	8000	nb
M101-in.wav	M101-out.wav	4.482	4.538	8000	nb
M102-in.wav	M102-out.wav	4.489	4.542	8000	nb
M103-in.wav	M103-out.wav	4.464	4.527	8000	nb
M104-in.wav	M104-out.wav	4.443	4.514	8000	nb
M105-in.wav	M105-out.wav	4.470	4.530	8000	nb
M106-in.wav	M106-out.wav	4.424	4.501	8000	nb
M107-in.wav	M107-out.wav	4.385	4.475	8000	nb
M108-in.wav	M108-out.wav	4.451	4.519	8000	nb
M109-in.wav	M109-out.wav	4.438	4.510	8000	nb
M110-in.wav	M110-out.wav	4.445	4.515	8000	nb

Obrázek 4.5: Výstup hodnocení metody PESQ do souboru

V doporučení ITU-T P.862 [10] byla popsána hodnota PESQMOS, která nabývá hodnot -0,5 až +4,5. Tato stupnice je od standardní stupnice MOS, která nabývá hodnot 1 až 5, posunuta. Proto bylo vydáno doporučení ITU-T P862.1 [18] které popisuje mapovací funkci, rovnice 4.1 a obrázek 4.6, pro přepočet nebo převod hodnoty PESQMOS na MOSLQO. Mapovací funkce převádí stupnici -0,5 až +4,5 na 1,02 až 4,56. Proto za výslednou hodnotu MOS musíme považovat MOS-LQO.

$$x = \frac{4,6607 - \ln\left(\frac{4,999 - y}{y - 0,999}\right)}{1,4945} \quad (4.1)$$



Obrázek 4.6: Mapovací funkce PESQ-MOS

4.1.5 Hodnocení pomocí AQuA

Analytický nástroj AQuA od finské společnosti SEVANA [19] je komerční software pro posuzování kvality řeči. V rámci své diplomové práce jsem tuto společnost oslovil s žádostí o poskytnutí licence. Vzhledem k dřívějším dobrým vztahům mezi VŠB-TU Ostrava a společností SEVANA jsem měl tuto licenci k dispozici za několik dnů.

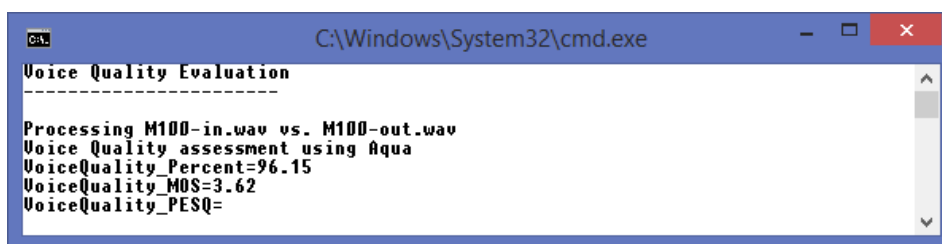
Samotné spuštění aplikace probíhá v příkazovém řádku a je velice podobné metodě PESQ.

```
test.bat M100-in.wav M100-out.wav
```

Výsledky se zapisují do souboru conformance_stat_new.txt. Aplikace AQuA nám vrátí dvě hodnoty. První je Voice Quality Percent, tato hodnota vyjadřuje míru podobnosti vzorků a druhou Voice Quality MOS. Hodnotu MOS nemusíme dále upravovat. Pro usnadnění práce jsem si vytvořil skript, který mi automaticky hodnotí všechny mužské a následně ženské vzorky.

Skript pro automatické hodnocení AQuA:

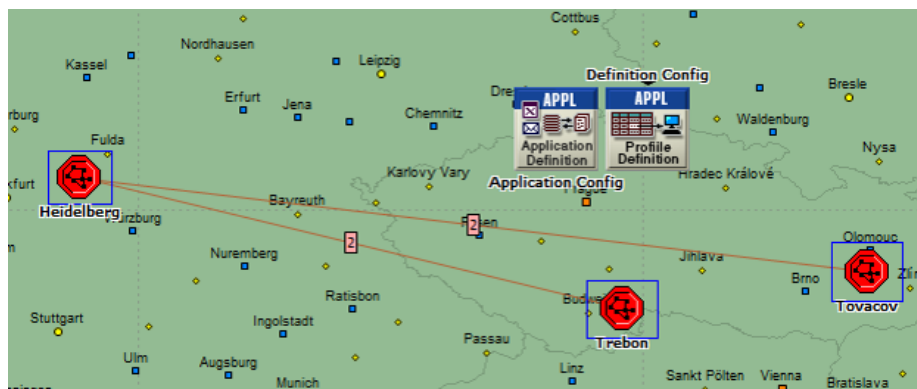
```
@echo off
FOR /L %%i IN (100 1 124) DO test.bat M%%i-in.wav M%%i-out.wav
sleep 5
```



Obrázek 4.7: Výstup hodnocení aplikace AQuA

4.2 Reálná verifikace

Při reálné verifikaci modelu jsem využil svých možností v zaměstnání, kde mám přístup k technologii ADSL. Tato technologie slouží jako datové propojení provozoven společnosti, pro které provádím servisní práce. Jednotlivé provozovny jsou připojeny pomocí technologie ADSL, které je distribuováno po telefonním vedení společnosti Telefónica O2 Czech Republic a. s., společnost tyto okruhy pronajímá společnosti British Telecommunication, která zajišťuje datové spojení s centrálou v Heidelbergu (DE).



Obrázek 4.8: Schéma propojení provozoven

Na provozovny Tovačov a Třeboň jsem umístil dva počítače „SIP Klient1“ a „SIP Klient2“, popisované v kapitole 4 na obrázku č. 4.1. Následně jsem mezi těmito počítači provedl spojení a přenesl vzorky audio nahrávek. V tabulce číslo 4.2 jsem provedl porovnání technologií ADSL v laboratorních podmínkách a skutečném prostředí. Je důležité zmínit, že obě provozovny jsou připojeny totožnou technologií. Proto jsou časy zpoždění vyšší, test na zpoždění a ztrátovost probíhal mezi dvěma provozovnami. U laboratorní části se test ztrátovosti a zpoždění monitoroval vždy jen pro jednu ADSL linku.

Tabulka 4.2: Parametry simulovaného a reálného ADSL

Typ rozhraní	Zpoždění (min.) [ms]	Zpoždění (max.) [ms]	Zpoždění (prům.) [ms]	Ztrátovost [%]
ADSL (laboratoř)	17	348	27	0,06
ADSL (reálné)	77	820	101	0,2
WiFi (laboratorní)	7	2007	11	0,3
WiFi (reálné)	1	1846	6	0,03

5 Zhodnocení dosažených výsledků

Při testech hodnocení kvality IP telefonie, pomocí výše popisovaných modelů, jsem hodnotil po dvaceti pěti audionahrávkách v mužském a ženském hlase, celkem 50 audionahrávek pro každou technologii. Po získání hodnot ze všech testovaných technologií jsem provedl statistickou analýzu výstupních dat na odlehlá pozorování. Větší počet odlehlých pozorování jsem zaznamenal u metody AQuA finské společnosti Sevana než u volně dostupné aplikace z ITU-T. Z naměřených hodnot MOS jsem vypočetl průměr, který mi slouží spíše jako orientační hodnota, kterou mohu porovnávat s mnohem přesnější statistickou hodnotou medián. Medián je hodnota, která není ovlivněna odlehlým pozorováním, proto ve výsledcích používám těchto hodnot.

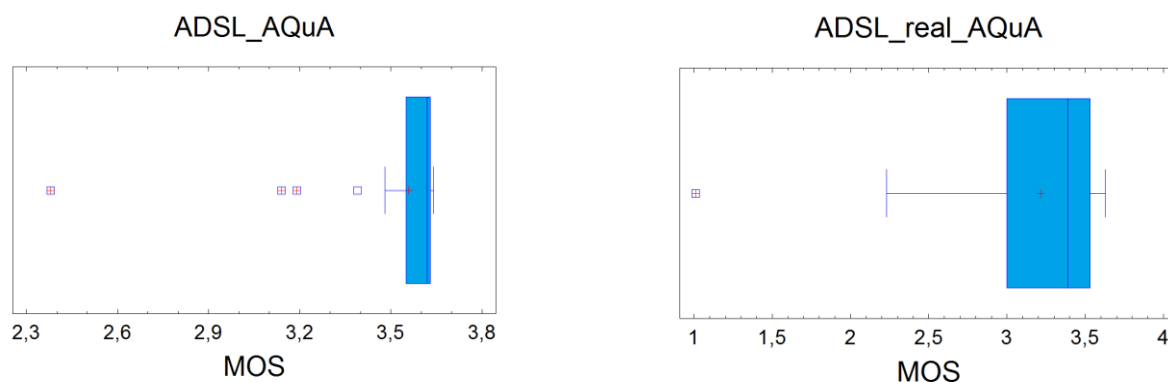
Hodnoty MOS jednotlivých technologií se liší i s použitým modelem testování. V některých případech je hodnota odlišná až o 0,9 bodu MOS. Tyto rozdíly jsou způsobeny odlišným mechanismem posuzování jednotlivých modelů.

Tabulka 5.1: *Porovnání MOS pro PESQ a AQuA*

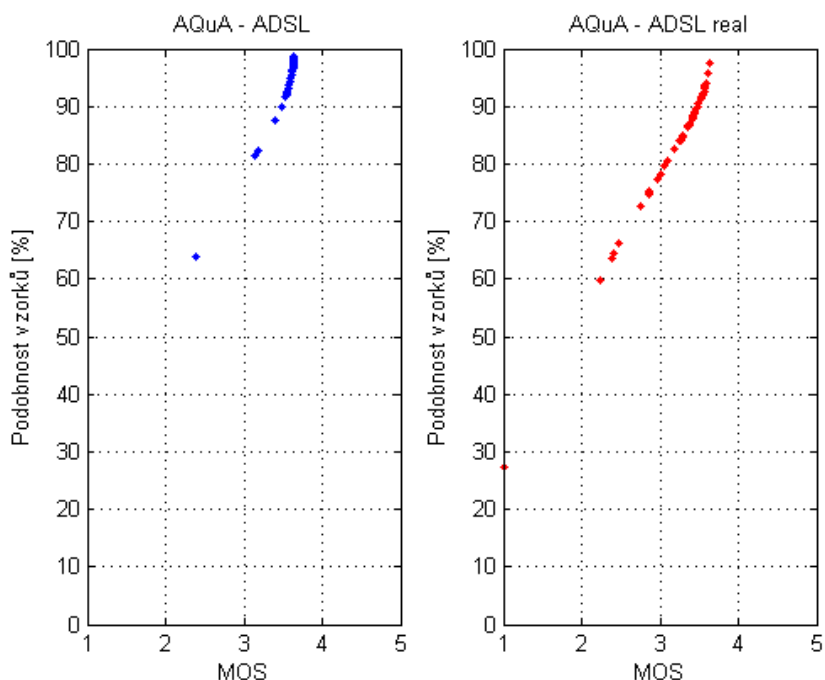
Technologie	MOS			
	Průměrná hodnota		Medián	
	PESQ	AQuA	PESQ	AQuA
ADSL	3,05	3,56	3,08	3,62
ADSL reálné	2,55	3,22	2,59	3,39
VDSL	3,91	3,59	3,93	3,63
Ethernet	4,51	3,62	4,51	3,63
WiFi	4,01	3,55	4,09	3,63
WiFi reálné	4,08	3,60	4,48	3,63
WiMAX	4,51	3,62	4,51	3,63

5.1 Vyhodnocení AQuA

Při porovnání testovaných technologií ADSL, u které jsem provedl test v laboratoři i v reálné síti, jsou odlehlá pozorování v reálné síti mnohonásobně menší než u laboratorního testu (1 : 4). Na obrázku 5.1 je testované ADSL v laboratoři (vlevo) a ADSL, ve skutečném výše popisovaném provozu, (vpravo). Experiment v laboratoři nezachycuje shluk ztrát a počítá s jejich rovnoměrným rozložením, tento jev se nejvíce projevuje u technologie ADSL.



Obrázek 5.1: *Odlehlá pozorování ADSL*



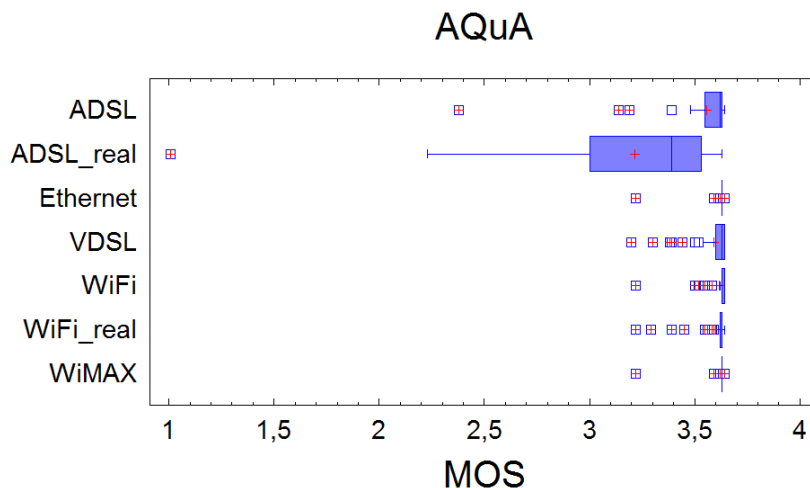
Obrázek 5.2: *Porovnání ADSL v laboratoři a reálné síti*

Pro ověření jsem provedl test technologie WiFi. V reálné simulaci jsem provozoval komunikaci mezi „SIP Klientem1“ umístěným v kanceláři a „SIP Klientem2“, umístěným v serverové místnosti své bezdrátové sítě. Přenos probíhal na běžné účastnické přípojce v pásmu 5 GHz technologie 802.11a/n s omezením rychlosti na 12 Mbit/s Download a 4 Mbit/s Upload.

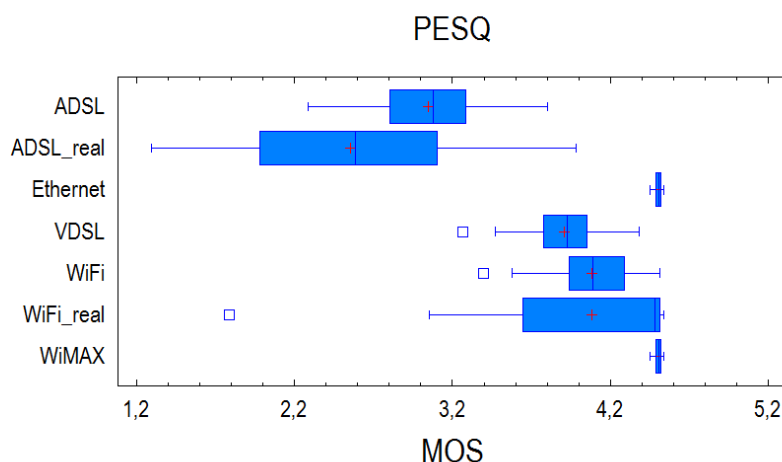
Nulová hypotéza:

„Měření na reálné WiFi síti bude podobné, z pohledu odlehlých pozorování, jako na reálné síti ADSL“.

Nulová hypotéza se nepotvrdila. Výsledky je možné pozorovat na obrázku 5.3, který zobrazuje odlehlá pozorování všech testovaných technologií.



Obrázek 5.3: *Test na odlehlá pozorování AQuA*



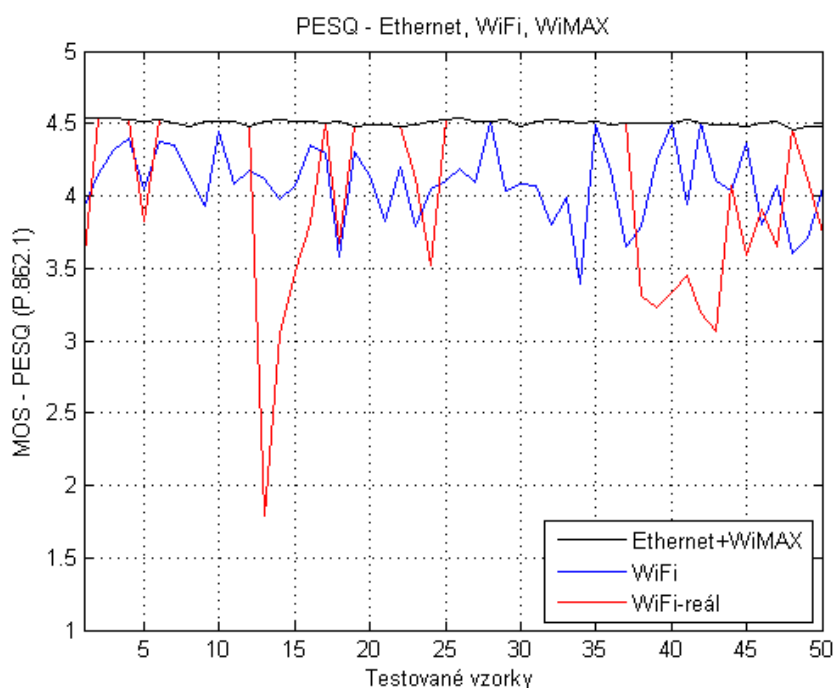
Obrázek 5.4: *Test na odlehlá pozorování PESQ*

Odlehlá pozorování a extrémy se do statistických výsledků nezahrnují. Slouží k nalezení a odstranění chyb, kterých jsme se mohli dopustit při sběru dat. Extrémy, které je možné pozorovat na obrázcích 5.3 a 5.4, jsou skutečné hodnoty, které jsem získal z výpočetních modelů. Tyto modely reagovaly na kvalitu vzorku, který procházel přes testované prostředí. Odlehlá pozorování nám zobrazují body, ve kterých došlo k zhoršení kvality přenosu dat. Zhoršení kvality mohlo být zapříčiněno přeslechů na vedení xDSL nebo rušením v bezdrátové oblasti WiFi. Nemalý podíl na kvalitě média má i chybná konfigurace sítě, která postrádá služby QoS (Quality of Service).

5.2 Vyhodnocení PESQ

Pro snadné vyčtení a porovnání zaznamenaných hodnot jsem vytvořil dva grafy. První graf na obrázku číslo 5.5 zobrazuje technologie, které v testech dopadly lépe. Křivka pro Ethernet a WiMAX je společná z důvodu velmi podobného průběhu (je mezi nimi minimální rozdíl). Na obrázku číslo 5.6 grafem popisují průběhy ADSL a VDSL technologií. V grafu je jasně viditelný rozdíl mezi reálným a simulovaným provozem ADSL technologie.

Technologie přístupových sítí jako jsou Ethernet a WiMAX vynikají nízkým rozptylem hodnot MOS. Jsou to technologie, které vynikají širokým pracovním pásmem pro přenos dat s minimálním rušením. Proto z testů vyšly nejlépe s hodnocením 4,5 MOS odpovídající dobré kvalitě bez obtěžujících výpadků.



Obrázek 5.5: PESQ – Ethernet, WiFi a WiMAX

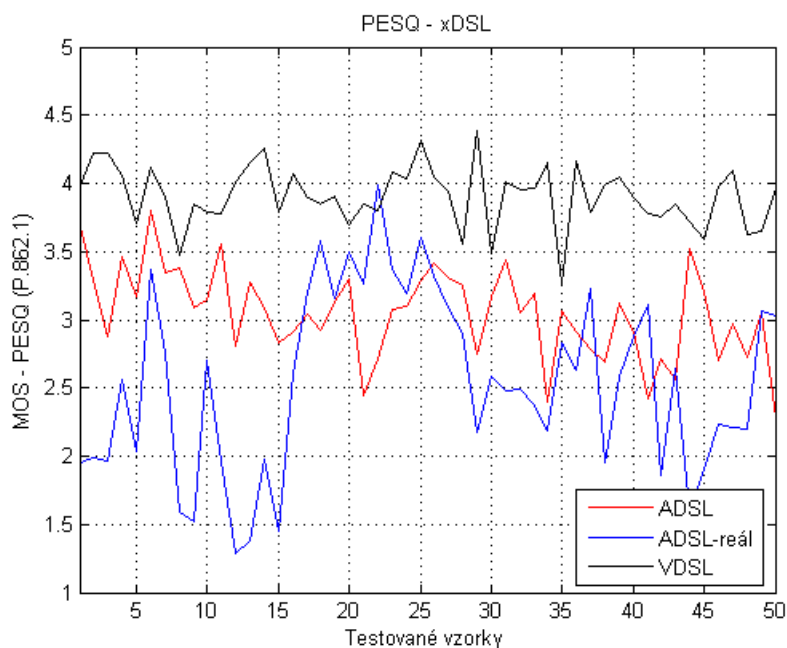
V těsném závěsu za Ethernet a WiMAX jsou technologie VDSL a WiFi. Výsledky těchto technologií jsou odlišné.

WiFi dosahuje skóre 3,6 až 4,4. MOS, hovoříme-li o testu, který probíhal ve skutečné provozované síti. Technologie WiFi je zastoupena svými výsledky v kategoriích s průměrnou (s mírně obtěžujícími výpadky) a dobrou kvalitou (bez obtěžujících výpadků). Na obrázku 5.5 s křivkou reálného testu WiFi, můžeme pozorovat propad 13. vzorku na hodnotu 1,8 MOS odpovídající špatné kvalitě (velmi obtěžující, nesrozumitelné). Výpadek ve srozumitelnosti u technologie WiFi má na svědomí rušení jinými bezdrátovými sítěmi. WiFi patří mezi velmi

oblíbené internetové připojení, v České republice tuto technologii využívá 42 % domácností připojených k Internetu.

VDSL pracuje v oblasti 3,8 až 4 MOS, které se svými parametry spadá do kategorie průměrné kvality s mírně obtěžujícími výpadky. WiFi nabízí vyšší kvalitu s občasnými chybami a VDSL stabilní, ale nižší kvalitu hovoru.

Nejhůře ze všech testovaných přístupových technologií dopadlo ADSL. Hodnoty od 1,5 do 3,2 na stupnici MOS odpovídají nízké (obtěžující s vynucením úsilí porozumět) a průměrné kvalitě (s mírně obtěžujícími výpadky).



Obrázek 5.6: PESQ – ADSL a VDSL

Z důvodu výše popsaných výsledků je technologie ADSL pro IP telefonii nevhodné médium. Ve své praxi jsem se setkal s nasazením telefonních služeb právě na ADSL. Z důvodu finanční úspory se běžné telefonní účastnické přípojky převádí na digitální ADSL či VDSL linky. V případě potřeby většího počtu čísel u účastníka, se tento požadavek řeší pomocí ISDN (Integrated Services Digital Network) služeb, kterou jsou finančně nákladné. Proto pevní operátoři umožnili přechod těchto linek na IP telefonii. Finanční náročnost se pro zákazníka sníží, ale současně s cenou klesá i kvalita hovoru. V případě přechodu na technologii VDSL nemusí zákazník zaznamenat zhoršenou kvalitu hlasových služeb. Problém nastává v lokalitách kde pokrytí pomocí VDSL není možné, z důvodu příliš velké vzdálenosti od telefonní ústředny (DSLAM).

6 Závěr

Cílem diplomové bylo popsat možnosti hodnocení kvality IP telefonie v přístupových sítích a provést vlastní verifikaci dostupných modelů na tyto sítě. Tento cíl jsem naplnil v plném rozsahu a rozšířil jsem jej o testování přístupových sítí v reálném provozu u dvou nejčastěji používaných technologií. Vytvořil jsem simulační model v prostředí OpnetModeler, provedl sestavení a měření v laboratorním prostředí. Zachycoval výsledky v reálných sítích a následně tyto výsledky porovnal. Po vyhodnocení získaných hodnot modelů jsem zjistil, že laboratorní modely nekorespondují s reálnými modely. Experimenty v laboratoři totiž nezachycují shluky ztát a počítají s jejich rovnoměrným rozložením. Tento jev se nejvíce projevil u ADSL.

V práci jsem mimo volně dostupných algoritmů organizace ITU-T využíval i komerční aplikaci, pro posuzování kvality hlasu, AQuA od finské společnosti Sevana. Získané výsledky z této aplikace se razantním způsobem liší od výsledků algoritmu ITU-T. Výsledky aplikace AQuA považuji za neprůkazné. Příliš vysoká podobnost hodnot kvality různých typů přístupových sítí je podezřelá. Získané hodnoty z aplikace AQuA jsem předal k bližšímu prozkoumání firmě Sevana, která se mi k problému vyjádřila: „PESQ a AQuA modely jsou odlišné, s cílem poskytnout více konzistentní výsledky za určitých podmínek a parametrů, proto AQuA může vyžadovat úpravu. Při změně základních parametrů jsme nezaznamenali velkou změnu. Budeme se tomuto problému dále věnovat a spolupracovat s VŠB-TU Ostrava.“

Diplomová práce se zabývala hodnocením kvality IP telefonie v pevných přístupových sítích. V případě rozšíření této diplomové práce bych navrhoval provést testy pro mobilní sítě třetí a čtvrté generace. Zejména technologií UMTS, HSDPA a LTE.

Použitá literatura

- [1] Telefónica Czech Republic – Finanční výsledek 1Q 2014 [online]. [cit. 9–12–2014]. Dostupné z: http://www.o2.cz/file_conver/360706/_140514_T CZ_1Q_2014_results_cz_TZ.pdf
- [2] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [3] Výkony, limity ČTU a GL č. 12/R/2000. *KHnet.info* [online]. [cit. 9–12–2014]. Dostupné z: <http://forum.khnet.info/viewtopic.php?f=10&t=964#p7299>
- [4] Single-ended method for objective speech quality assessment in narrow-band telephony application [online]. [cit. 14–1–2015]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.563-200405-I/en>
- [5] 3SQM™ ADVANCED NON-INTRUSIVE VOICE QUALITY TESTING, [online]. [cit. 14–1–2015]. Dostupné z: <http://www.opticom.de/download/3SQM-WP-290604.pdf>
- [6] Telefónica O2 Czech Republic – Finanční výsledky za leden až březen 2014 [online]. [cit. 14–1–2015]. Dostupné z: http://www.o2.cz/file_conver/360706/_140514_T CZ_1Q_2014_results_cz_TZ.pdf
- [7] ITU–T G.993.2 Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2) [online]. [cit. 14–1–2015]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/dologin.asp?lang=e&id=T-REC-G.993.2-200707-T!Amd1-Cor1!PDF-E&type=item>
- [8] METHODS FOR SUBJECTIVE DETERMINATION OF TRANSMISSION QUALITY [online]. [cit. 15–1–2015]. Dostupné z: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-P.800-199608-I!!PDF-E&type=items
- [9] Objective quality measurement of telephoneband (300 – 3400 Hz) speech codecs [online]. [cit. 15–1–2015]. Dostupné z: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-P.861-199608-S!!PDF-E&type=items
- [10] ITU–T P.862 Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) [online]. [cit. 15–1–2015]. Dostupné z: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-P.862-200102-I!!SOFT-ZST-E&type=items
- [11] PSQM, PSQM+ Opticom [online]. [cit. 15–1–2015]. <http://www.opticom.de/technology/psqm.php>
- [12] PESQ Opticom [online]. [cit. 15.1.2015] www.opticom.de/technology/pesq.php
- [13] FELD – ČVUT, Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) [online]. [cit. 20–1–2015]. Dostupné z: <http://www.access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2004072809>

- [14] ITU-T P.863 Percentual objective listening quality assessment [online]. [cit. 1–4–2015]. Dostupné z: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-P.863-201111-S!Amd1!PDF-E&type=items
- [15] Bc. FEČU, Radim, Hodnocení kvality řeči v IP sítích, Ostrava, 2013, Bakalářská práce. VŠB-TU. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D. [online]. [cit. 1–4–2015]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/98699?show=full>
- [16] Manual tc /acket Filtering and netem [online]. [cit. 2–4–2015]. Dostupné z: <http://tcn.hypert.net/tcmanual.pdf>
- [17] PESQ Opticom [online]. [cit. 15–1–2015]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-P.862-200102-I!!SOFT-ZST-E&type=items
- [18] P.862.1 : Mapping function for transforming P.862 raw result scores to MOS–LQO [online]. [cit. 1–4–2015]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-P.862.1-200311-I!!PDF-E&type=items
- [19] SEVANA AQuA – Audio Quality Analyzer [online]. [1–4–2015]. Dostupné z: http://www.sevana.fi/voice_quality_testing_measurement_analysis.php

Seznam příloh

Příloha A: Naměřené hodnoty I

Příloha B: Zdrojový kód pro přepočítání PESQMOS na MOSLQO, mapovací funkce X

Příloha C: Zdrojový kód pro vyhodnocení závislosti MOS na jednotlivých technologiích ... X

Součástí DP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

- Obrazky
- PESQmamalo
 - Software
 - Conform
 - Source
- Programy_Matlab
- Sevana
 - Aqua
 - Docs
 - Temp
- Vysledky_Lab
 - ADSL
 - czM
 - czZ
 - Optika-ethernet
 - czM
 - czZ
 - VDSL
 - czM
 - czZ
 - WiFi
 - czM
 - czZ
 - WiMAX
 - czM
 - czZ
- Vysledky_Real
 - ADSL
 - czM
 - czZ
 - WiFi
 - czM

- czZ
- Vzorky_Audio
 - czM
 - czZ

Příloha A: *Naměřené hodnoty*Tabulka A.1: *Technologie ADSL*

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	AQUA	PODOBNOST
M100-in.wav	M100-out.wav	3,612	3,705	3,64	99,19
M101-in.wav	M101-out.wav	3.310	3,283	3,63	96,98
M102-in.wav	M102-out.wav	3.034	2,873	3,64	98,44
M103-in.wav	M103-out.wav	3.433	3,46	3,53	91,73
M104-in.wav	M104-out.wav	3.229	3,164	3,63	96,91
M105-in.wav	M105-out.wav	3.686	3,8	3,54	91,88
M106-in.wav	M106-out.wav	3.352	3,345	3,62	96,12
M107-in.wav	M107-out.wav	3.374	3,376	3,39	87,55
M108-in.wav	M108-out.wav	3.179	3,089	3,64	98,49
M109-in.wav	M109-out.wav	3.219	3,148	3,64	98,71
M110-in.wav	M110-out.wav	3.497	3,55	3,58	93,57
M111-in.wav	M111-out.wav	2.987	2,803	3,54	91,89
M112-in.wav	M112-out.wav	3.303	3,273	3,62	96,16
M113-in.wav	M113-out.wav	3.175	3,084	3,63	96,82
M114-in.wav	M114-out.wav	3.006	2,831	3,59	94,28
M115-in.wav	M115-out.wav	3.059	2,91	3,63	96,99
M116-in.wav	M116-out.wav	3.145	3,039	3,64	98,29
M117-in.wav	M117-out.wav	3.066	2,92	3,63	97,15
M118-in.wav	M118-out.wav	3.207	3,132	3,63	96,95
M119-in.wav	M119-out.wav	3.319	3,297	3,64	98,61
M120-in.wav	M120-out.wav	2.740	2,448	3,58	93,78
M121-in.wav	M121-out.wav	2.929	2,717	3,57	93,03
M122-in.wav	M122-out.wav	3.170	3,076	3,62	95,6
M123-in.wav	M123-out.wav	3.187	3,101	3,61	95,56
M124-in.wav	M124-out.wav	3.310	3,283	3,64	98,42
Z100-in.wav	Z100-out.wav	3.401	3,415	2,38	63,83
Z101-in.wav	Z101-out.wav	3.328	3,31	3,62	96,05
Z102-in.wav	Z102-out.wav	3.291	3,256	3,63	96,56
Z103-in.wav	Z103-out.wav	2.944	2,74	3,19	82,43
Z104-in.wav	Z104-out.wav	3.235	3,173	3,64	98,32
Z105-in.wav	Z105-out.wav	3.415	3,435	3,55	92,24
Z106-in.wav	Z106-out.wav	3.158	3,058	3,63	97,38
Z107-in.wav	Z107-out.wav	3.250	3,195	3,63	96,89
Z108-in.wav	Z108-out.wav	2.700	2,393	3,48	89,97
Z109-in.wav	Z109-out.wav	3.160	3,061	3,6	94,9
Z110-in.wav	Z110-out.wav	3.062	2,915	3,14	81,35

Z111-in.wav	Z111-out.wav	2.970	2,778	3,62	96,33
Z112-in.wav	Z112-out.wav	2.912	2,693	3,62	96,26
Z113-in.wav	Z113-out.wav	3.201	3,122	3,63	97,42
Z114-in.wav	Z114-out.wav	3.062	2,915	3,54	92,02
Z115-in.wav	Z115-out.wav	2.720	2,42	3,63	97,73
Z116-in.wav	Z116-out.wav	2.928	2,715	3,63	96,94
Z117-in.wav	Z117-out.wav	2.824	2,566	3,62	95,92
Z118-in.wav	Z118-out.wav	3.478	3,524	3,64	98,19
Z119-in.wav	Z119-out.wav	3.260	3,209	3,6	94,92
Z120-in.wav	Z120-out.wav	2.917	2,701	3,64	98,08
Z121-in.wav	Z121-out.wav	3.103	2,975	3,64	97,86
Z122-in.wav	Z122-out.wav	2.935	2,727	3,53	91,6
Z123-in.wav	Z123-out.wav	3.158	3,057	3,48	90,01
Z124-in.wav	Z124-out.wav	2.617	2,283	3,55	92,45

Tabulka A.2: *Technologie ADSL – reálná síť*

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	AQUA	PODOBNOST
M100-in.wav	M100-out.wav	2,337	1,948	3,54	91,86
M101-in.wav	M101-out.wav	2,379	1,994	3,41	88,01
M102-in.wav	M102-out.wav	2,356	1,969	3,44	88,68
M103-in.wav	M103-out.wav	2,818	2,558	3,19	82,61
M104-in.wav	M104-out.wav	2,411	2,03	3,59	93,95
M105-in.wav	M105-out.wav	3,371	3,372	3,06	79,63
M106-in.wav	M106-out.wav	2,961	2,765	3,37	86,96
M107-in.wav	M107-out.wav	1,949	1,592	2,85	74,79
M108-in.wav	M108-out.wav	1,848	1,52	3,35	86,34
M109-in.wav	M109-out.wav	2,914	2,696	3,42	88,23
M110-in.wav	M110-out.wav	2,35	1,962	3	78,31
M111-in.wav	M111-out.wav	1,417	1,291	2,38	63,74
M112-in.wav	M112-out.wav	1,605	1,376	2,86	75,01
M113-in.wav	M113-out.wav	2,364	1,977	2,86	75,15
M114-in.wav	M114-out.wav	1,73	1,445	2,87	75,31
M115-in.wav	M115-out.wav	2,854	2,609	2,96	77,4
M116-in.wav	M116-out.wav	3,259	3,208	3,63	97,65
M117-in.wav	M117-out.wav	3,521	3,584	3,62	95,69
M118-in.wav	M118-out.wav	3,223	3,155	3,44	88,69
M119-in.wav	M119-out.wav	3,458	3,496	3,57	93,31
M120-in.wav	M120-out.wav	3,299	3,267	3,29	84,82
M121-in.wav	M121-out.wav	3,842	3,985	3,57	93,24
M122-in.wav	M122-out.wav	3,369	3,369	3,55	92,24

M123-in.wav	M123-out.wav	3,251	3,196	3,58	93,62
M124-in.wav	M124-out.wav	3,535	3,602	3,49	90,41
Z100-in.wav	Z100-out.wav	3,333	3,317	2,23	59,91
Z101-in.wav	Z101-out.wav	3,176	3,085	3,47	89,65
Z102-in.wav	Z102-out.wav	3,054	2,902	3,26	84,13
Z103-in.wav	Z103-out.wav	2,537	2,181	3,53	91,63
Z104-in.wav	Z104-out.wav	2,84	2,588	3,54	92,15
Z105-in.wav	Z105-out.wav	2,766	2,483	1,01	27,48
Z106-in.wav	Z106-out.wav	2,772	2,492	3,54	92,01
Z107-in.wav	Z107-out.wav	2,69	2,38	3,52	91,46
Z108-in.wav	Z108-out.wav	2,546	2,192	2,41	64,57
Z109-in.wav	Z109-out.wav	3,003	2,827	3,56	92,59
Z110-in.wav	Z110-out.wav	2,869	2,63	3,36	86,61
Z111-in.wav	Z111-out.wav	3,275	3,232	3,55	92,25
Z112-in.wav	Z112-out.wav	2,337	1,948	2,48	66,35
Z113-in.wav	Z113-out.wav	2,839	2,588	3,43	88,59
Z114-in.wav	Z114-out.wav	3,034	2,873	3,44	88,79
Z115-in.wav	Z115-out.wav	3,19	3,106	3,36	86,63
Z116-in.wav	Z116-out.wav	2,257	1,864	2,75	72,67
Z117-in.wav	Z117-out.wav	2,878	2,643	3,28	84,56
Z118-in.wav	Z118-out.wav	1,96	1,601	3,25	83,92
Z119-in.wav	Z119-out.wav	2,301	1,909	2,96	77,37
Z120-in.wav	Z120-out.wav	2,579	2,234	3,53	91,74
Z121-in.wav	Z121-out.wav	2,56	2,209	3,48	89,91
Z122-in.wav	Z122-out.wav	2,549	2,195	3,1	80,41
Z123-in.wav	Z123-out.wav	3,164	3,066	3,37	86,83
Z124-in.wav	Z124-out.wav	3,14	3,031	3,45	89

Tabulka A.3: *Technologie VDSL*

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	AQUA	PODOBNOST
M100-in.wav	M100-out.wav	3,83	3,972	3,63	99,5
M101-in.wav	M101-out.wav	4,067	4,219	3,63	99,58
M102-in.wav	M102-out.wav	4,07	4,221	3,63	99,23
M103-in.wav	M103-out.wav	3,903	4,054	3,52	91,27
M104-in.wav	M104-out.wav	3,612	3,704	3,63	97,45
M105-in.wav	M105-out.wav	3,962	4,115	3,63	99,36
M106-in.wav	M106-out.wav	3,77	3,902	3,62	96,01
M107-in.wav	M107-out.wav	3,44	3,47	3,61	95,27
M108-in.wav	M108-out.wav	3,728	3,851	3,64	99,06
M109-in.wav	M109-out.wav	3,676	3,787	3,64	98,76

M110-in.wav	M110-out.wav	3,669	3,778	3,58	93,54
M111-in.wav	M111-out.wav	3,866	4,013	3,44	88,78
M112-in.wav	M112-out.wav	4,002	4,156	3,6	94,8
M113-in.wav	M113-out.wav	4,111	4,259	3,63	99,65
M114-in.wav	M114-out.wav	3,674	3,784	3,5	90,79
M115-in.wav	M115-out.wav	3,917	4,069	3,63	99,28
M116-in.wav	M116-out.wav	3,758	3,889	3,63	99,3
M117-in.wav	M117-out.wav	3,727	3,851	3,63	99,61
M118-in.wav	M118-out.wav	3,771	3,904	3,54	91,95
M119-in.wav	M119-out.wav	3,607	3,698	3,64	97,97
M120-in.wav	M120-out.wav	3,729	3,853	3,64	99,09
M121-in.wav	M121-out.wav	3,687	3,801	3,63	97,59
M122-in.wav	M122-out.wav	3,929	4,081	3,62	95,86
M123-in.wav	M123-out.wav	3,882	4,031	3,64	98,61
M124-in.wav	M124-out.wav	4,177	4,316	3,63	99,49
Z100-in.wav	Z100-out.wav	3,898	4,048	3,64	97,92
Z101-in.wav	Z101-out.wav	3,808	3,947	3,64	99,05
Z102-in.wav	Z102-out.wav	3,502	3,557	3,64	98,79
Z103-in.wav	Z103-out.wav	4,262	4,385	3,63	99,7
Z104-in.wav	Z104-out.wav	3,452	3,487	3,64	97,97
Z105-in.wav	Z105-out.wav	3,865	4,012	3,62	96,38
Z106-in.wav	Z106-out.wav	3,818	3,959	3,63	99,86
Z107-in.wav	Z107-out.wav	3,824	3,966	3,63	97,16
Z108-in.wav	Z108-out.wav	3,996	4,149	3,38	87,26
Z109-in.wav	Z109-out.wav	3,299	3,267	3,39	87,34
Z110-in.wav	Z110-out.wav	4,011	4,165	3,2	82,67
Z111-in.wav	Z111-out.wav	3,676	3,787	3,57	93,39
Z112-in.wav	Z112-out.wav	3,841	3,984	3,63	99,64
Z113-in.wav	Z113-out.wav	3,902	4,052	3,63	99,68
Z114-in.wav	Z114-out.wav	3,761	3,892	3,64	98,61
Z115-in.wav	Z115-out.wav	3,665	3,773	3,59	94,23
Z116-in.wav	Z116-out.wav	3,647	3,75	3,64	98,94
Z117-in.wav	Z117-out.wav	3,722	3,845	3,62	96,3
Z118-in.wav	Z118-out.wav	3,619	3,714	3,64	98,39
Z119-in.wav	Z119-out.wav	3,527	3,591	3,3	85,15
Z120-in.wav	Z120-out.wav	3,839	3,982	3,63	99,35
Z121-in.wav	Z121-out.wav	3,94	4,093	3,63	99,4
Z122-in.wav	Z122-out.wav	3,556	3,63	3,64	98,87
Z123-in.wav	Z123-out.wav	3,567	3,646	3,61	95,56
Z124-in.wav	Z124-out.wav	3,82	3,961	3,58	93,55

Tabulka A.4: Technologie Ethernet

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	AQUA	PODOBNOST
M100-in.wav	M100-out.wav	4,482	4,538	3,63	99,9
M101-in.wav	M101-out.wav	4,482	4,538	3,63	99,91
M102-in.wav	M102-out.wav	4,489	4,542	3,63	99,81
M103-in.wav	M103-out.wav	4,464	4,527	3,63	99,65
M104-in.wav	M104-out.wav	4,443	4,514	3,64	98,19
M105-in.wav	M105-out.wav	4,47	4,53	3,63	99,64
M106-in.wav	M106-out.wav	4,424	4,501	3,64	98,13
M107-in.wav	M107-out.wav	4,385	4,475	3,63	97,23
M108-in.wav	M108-out.wav	4,451	4,519	3,64	98,92
M109-in.wav	M109-out.wav	4,438	4,51	3,63	99,29
M110-in.wav	M110-out.wav	4,445	4,515	3,63	99,83
M111-in.wav	M111-out.wav	4,387	4,477	3,63	97,01
M112-in.wav	M112-out.wav	4,449	4,518	3,64	99,03
M113-in.wav	M113-out.wav	4,456	4,522	3,63	99,74
M114-in.wav	M114-out.wav	4,454	4,52	3,63	99,63
M115-in.wav	M115-out.wav	4,445	4,515	3,63	99,88
M116-in.wav	M116-out.wav	4,428	4,504	3,63	99,68
M117-in.wav	M117-out.wav	4,451	4,519	3,63	99,92
M118-in.wav	M118-out.wav	4,394	4,481	3,63	99,5
M119-in.wav	M119-out.wav	4,405	4,489	3,64	99,02
M120-in.wav	M120-out.wav	4,407	4,49	3,63	99,43
M121-in.wav	M121-out.wav	4,393	4,48	3,63	97,64
M122-in.wav	M122-out.wav	4,41	4,492	3,62	96,25
M123-in.wav	M123-out.wav	4,438	4,51	3,64	98,86
M124-in.wav	M124-out.wav	4,456	4,522	3,63	99,69
Z100-in.wav	Z100-out.wav	4,476	4,534	3,63	99,73
Z101-in.wav	Z101-out.wav	4,441	4,512	3,63	99,86
Z102-in.wav	Z102-out.wav	4,449	4,517	3,63	99,43
Z103-in.wav	Z103-out.wav	4,458	4,523	3,63	99,7
Z104-in.wav	Z104-out.wav	4,397	4,484	3,63	99,51
Z105-in.wav	Z105-out.wav	4,446	4,516	3,64	98,92
Z106-in.wav	Z106-out.wav	4,456	4,522	3,63	99,93
Z107-in.wav	Z107-out.wav	4,453	4,52	3,63	99,44
Z108-in.wav	Z108-out.wav	4,424	4,501	3,63	99,38
Z109-in.wav	Z109-out.wav	4,447	4,516	3,63	99,81
Z110-in.wav	Z110-out.wav	4,41	4,492	3,22	83,24
Z111-in.wav	Z111-out.wav	4,427	4,503	3,63	97,05
Z112-in.wav	Z112-out.wav	4,434	4,508	3,63	99,73
Z113-in.wav	Z113-out.wav	4,423	4,5	3,63	99,82
Z114-in.wav	Z114-out.wav	4,428	4,504	3,63	99,48

Z115-in.wav	Z115-out.wav	4,463	4,526	3,63	99,73
Z116-in.wav	Z116-out.wav	4,418	4,498	3,63	99,84
Z117-in.wav	Z117-out.wav	4,415	4,496	3,63	99,71
Z118-in.wav	Z118-out.wav	4,417	4,497	3,63	99,32
Z119-in.wav	Z119-out.wav	4,384	4,474	3,64	99,12
Z120-in.wav	Z120-out.wav	4,435	4,508	3,63	99,93
Z121-in.wav	Z121-out.wav	4,452	4,519	3,63	99,76
Z122-in.wav	Z122-out.wav	4,356	4,455	3,63	99,69
Z123-in.wav	Z123-out.wav	4,385	4,475	3,64	99,16
Z124-in.wav	Z124-out.wav	4,389	4,478	3,59	94,2

Tabulka A.5: *Technologie WiFi*

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	AQUA	PODOBNOST
M100-in.wav	M100-out.wav	3,781	3,916	3,64	98,73
M101-in.wav	M101-out.wav	3,998	4,151	3,52	91,47
M102-in.wav	M102-out.wav	4,175	4,315	3,63	99,76
M103-in.wav	M103-out.wav	4,284	4,403	3,63	99,61
M104-in.wav	M104-out.wav	3,891	4,041	3,64	98,15
M105-in.wav	M105-out.wav	4,255	4,38	3,64	99,20
M106-in.wav	M106-out.wav	4,213	4,347	3,64	97,98
M107-in.wav	M107-out.wav	3,974	4,128	3,55	92,33
M108-in.wav	M108-out.wav	3,794	3,931	3,64	98,63
M109-in.wav	M109-out.wav	4,348	4,45	3,63	99,29
M110-in.wav	M110-out.wav	3,929	4,081	3,63	99,83
M111-in.wav	M111-out.wav	4,017	4,171	3,63	96,94
M112-in.wav	M112-out.wav	3,966	4,12	3,64	99,00
M113-in.wav	M113-out.wav	3,838	3,981	3,64	99,10
M114-in.wav	M114-out.wav	3,916	4,068	3,63	99,50
M115-in.wav	M115-out.wav	4,217	4,35	3,63	99,68
M116-in.wav	M116-out.wav	4,147	4,291	3,63	99,67
M117-in.wav	M117-out.wav	3,517	3,578	3,64	98,80
M118-in.wav	M118-out.wav	4,166	4,307	3,63	99,36
M119-in.wav	M119-out.wav	3,981	4,135	3,62	95,93
M120-in.wav	M120-out.wav	3,705	3,824	3,64	99,19
M121-in.wav	M121-out.wav	4,047	4,2	3,63	97,52
M122-in.wav	M122-out.wav	3,682	3,795	3,62	96,06
M123-in.wav	M123-out.wav	3,896	4,046	3,63	99,23
M124-in.wav	M124-out.wav	3,954	4,107	3,63	99,59
Z100-in.wav	Z100-out.wav	4,032	4,185	3,63	99,69
Z101-in.wav	Z101-out.wav	3,944	4,097	3,64	98,91

Z102-in.wav	Z102-out.wav	4,449	4,517	3,63	99,43
Z103-in.wav	Z103-out.wav	3,888	4,037	3,63	99,66
Z104-in.wav	Z104-out.wav	3,932	4,085	3,63	99,46
Z105-in.wav	Z105-out.wav	3,914	4,065	3,63	96,68
Z106-in.wav	Z106-out.wav	3,689	3,804	3,63	99,74
Z107-in.wav	Z107-out.wav	3,845	3,989	3,64	99,12
Z108-in.wav	Z108-out.wav	3,388	3,396	3,63	97,35
Z109-in.wav	Z109-out.wav	4,417	4,497	3,63	99,81
Z110-in.wav	Z110-out.wav	4,019	4,172	3,22	83,21
Z111-in.wav	Z111-out.wav	3,569	3,648	3,62	96,13
Z112-in.wav	Z112-out.wav	3,682	3,795	3,50	90,63
Z113-in.wav	Z113-out.wav	4,091	4,241	3,63	99,82
Z114-in.wav	Z114-out.wav	4,428	4,504	3,63	99,48
Z115-in.wav	Z115-out.wav	3,802	3,94	3,64	99,14
Z116-in.wav	Z116-out.wav	4,418	4,498	3,63	99,84
Z117-in.wav	Z117-out.wav	3,956	4,109	3,64	99,16
Z118-in.wav	Z118-out.wav	3,881	4,03	3,64	97,83
Z119-in.wav	Z119-out.wav	4,237	4,366	3,64	99,16
Z120-in.wav	Z120-out.wav	3,684	3,797	3,63	99,39
Z121-in.wav	Z121-out.wav	3,92	4,072	3,63	99,69
Z122-in.wav	Z122-out.wav	3,537	3,604	3,64	97,83
Z123-in.wav	Z123-out.wav	3,617	3,711	3,63	97,04
Z124-in.wav	Z124-out.wav	3,908	4,059	3,58	93,58

Tabulka A.6: *Technologie WiFi – reálná síť*

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	AQUA	PODOBNOST
M100-in.wav	M100-out.wav	3.485	3,534	3,62	96,15
M101-in.wav	M101-out.wav	4.482	4,538	3,63	99,91
M102-in.wav	M102-out.wav	4.489	4,542	3,63	99,81
M103-in.wav	M103-out.wav	4.464	4,527	3,63	99,65
M104-in.wav	M104-out.wav	3.707	3,826	3,64	97,81
M105-in.wav	M105-out.wav	4.470	4,53	3,63	99,64
M106-in.wav	M106-out.wav	4.424	4,501	3,64	98,13
M107-in.wav	M107-out.wav	4.385	4,475	3,63	97,23
M108-in.wav	M108-out.wav	4.451	4,519	3,64	98,92
M109-in.wav	M109-out.wav	4.438	4,51	3,63	99,29
M110-in.wav	M110-out.wav	4.445	4,515	3,63	99,83
M111-in.wav	M111-out.wav	4.387	4,477	3,63	97,01
M112-in.wav	M112-out.wav	2.177	1,786	3,29	85
M113-in.wav	M113-out.wav	3.155	3,054	3,55	92,49

M114-in.wav	M114-out.wav	3.442	3,474	3,55	92,39
M115-in.wav	M115-out.wav	3.698	3,814	3,59	94,35
M116-in.wav	M116-out.wav	4.428	4,504	3,63	99,68
M117-in.wav	M117-out.wav	3.584	3,668	3,64	98,84
M118-in.wav	M118-out.wav	4.394	4,481	3,63	99,5
M119-in.wav	M119-out.wav	4.405	4,489	3,64	99,02
M120-in.wav	M120-out.wav	4.407	4,49	3,63	99,43
M121-in.wav	M121-out.wav	4.393	4,48	3,63	97,64
M122-in.wav	M122-out.wav	3.961	4,114	3,62	95,61
M123-in.wav	M123-out.wav	3.478	3,523	3,62	95,61
M124-in.wav	M124-out.wav	4.456	4,522	3,63	99,69
Z100-in.wav	Z100-out.wav	4.476	4,534	3,63	99,73
Z101-in.wav	Z101-out.wav	4.441	4,512	3,63	99,86
Z102-in.wav	Z102-out.wav	4.449	4,517	3,63	99,43
Z103-in.wav	Z103-out.wav	4.458	4,523	3,63	99,7
Z104-in.wav	Z104-out.wav	4.397	4,484	3,63	99,51
Z105-in.wav	Z105-out.wav	4.446	4,516	3,64	98,92
Z106-in.wav	Z106-out.wav	4.456	4,522	3,63	99,93
Z107-in.wav	Z107-out.wav	4.453	4,52	3,63	99,44
Z108-in.wav	Z108-out.wav	4.424	4,501	3,63	99,38
Z109-in.wav	Z109-out.wav	4.447	4,516	3,63	99,81
Z110-in.wav	Z110-out.wav	4.410	4,492	3,22	83,24
Z111-in.wav	Z111-out.wav	4.427	4,503	3,63	97,05
Z112-in.wav	Z112-out.wav	3.331	3,314	3,39	87,45
Z113-in.wav	Z113-out.wav	3.271	3,225	3,56	92,6
Z114-in.wav	Z114-out.wav	3.348	3,339	3,45	89,18
Z115-in.wav	Z115-out.wav	3.422	3,445	3,64	97,92
Z116-in.wav	Z116-out.wav	3.247	3,19	3,61	95,25
Z117-in.wav	Z117-out.wav	3.161	3,062	3,63	97,29
Z118-in.wav	Z118-out.wav	3.918	4,069	3,64	98,87
Z119-in.wav	Z119-out.wav	3.529	3,593	3,63	97,57
Z120-in.wav	Z120-out.wav	3.772	3,904	3,63	97,04
Z121-in.wav	Z121-out.wav	3.569	3,647	3,64	99,15
Z122-in.wav	Z122-out.wav	4.356	4,455	3,63	99,69
Z123-in.wav	Z123-out.wav	3.965	4,119	3,58	93,79
Z124-in.wav	Z124-out.wav	3.645	3,748	3,61	95,37

Tabulka A.7: *Technologie WiMAX*

REFERENCE	DEGRADED	PESQMOS	MOSLQO	AQUA	PODOBNOST
M100-in.wav	M100-out.wav	4,482	4,538	3,63	99,9

M101-in.wav	M101-out.wav	4,482	4,538	3,63	99,91
M102-in.wav	M102-out.wav	4,489	4,542	3,63	99,81
M103-in.wav	M103-out.wav	4,464	4,527	3,63	99,65
M104-in.wav	M104-out.wav	4,443	4,514	3,64	98,19
M105-in.wav	M105-out.wav	4,47	4,53	3,63	99,64
M106-in.wav	M106-out.wav	4,424	4,501	3,64	98,13
M107-in.wav	M107-out.wav	4,385	4,475	3,63	97,23
M108-in.wav	M108-out.wav	4,451	4,519	3,64	98,92
M109-in.wav	M109-out.wav	4,438	4,51	3,63	99,29
M110-in.wav	M110-out.wav	4,445	4,515	3,63	99,83
M111-in.wav	M111-out.wav	4,387	4,477	3,63	97,01
M112-in.wav	M112-out.wav	4,449	4,518	3,64	99,03
M113-in.wav	M113-out.wav	4,456	4,522	3,63	99,74
M114-in.wav	M114-out.wav	4,454	4,52	3,63	99,63
M115-in.wav	M115-out.wav	4,445	4,515	3,63	99,88
M116-in.wav	M116-out.wav	4,428	4,504	3,63	99,68
M117-in.wav	M117-out.wav	4,451	4,519	3,63	99,92
M118-in.wav	M118-out.wav	4,394	4,481	3,63	99,5
M119-in.wav	M119-out.wav	4,405	4,489	3,64	99,02
M120-in.wav	M120-out.wav	4,407	4,49	3,63	99,43
M121-in.wav	M121-out.wav	4,393	4,48	3,63	97,64
M122-in.wav	M122-out.wav	4,41	4,492	3,62	96,25
M123-in.wav	M123-out.wav	4,438	4,51	3,64	98,86
M124-in.wav	M124-out.wav	4,456	4,522	3,63	99,69
Z100-in.wav	Z100-out.wav	4,476	4,534	3,63	99,73
Z101-in.wav	Z101-out.wav	4,441	4,512	3,63	99,86
Z102-in.wav	Z102-out.wav	4,449	4,517	3,63	99,43
Z103-in.wav	Z103-out.wav	4,458	4,523	3,63	99,7
Z104-in.wav	Z104-out.wav	4,397	4,484	3,63	99,51
Z105-in.wav	Z105-out.wav	4,446	4,516	3,64	98,92
Z106-in.wav	Z106-out.wav	4,456	4,522	3,63	99,93
Z107-in.wav	Z107-out.wav	4,453	4,52	3,63	99,44
Z108-in.wav	Z108-out.wav	4,424	4,501	3,63	99,38
Z109-in.wav	Z109-out.wav	4,447	4,516	3,63	99,81
Z110-in.wav	Z110-out.wav	4,41	4,492	3,22	83,24
Z111-in.wav	Z111-out.wav	4,427	4,503	3,63	97,05
Z112-in.wav	Z112-out.wav	4,434	4,508	3,63	99,73
Z113-in.wav	Z113-out.wav	4,423	4,5	3,63	99,82
Z114-in.wav	Z114-out.wav	4,428	4,504	3,63	99,48
Z115-in.wav	Z115-out.wav	4,463	4,526	3,63	99,73
Z116-in.wav	Z116-out.wav	4,418	4,498	3,63	99,84
Z117-in.wav	Z117-out.wav	4,415	4,496	3,63	99,71

Z118-in.wav	Z118-out.wav	4,417	4,497	3,63	99,32
Z119-in.wav	Z119-out.wav	4,384	4,474	3,64	99,12
Z120-in.wav	Z120-out.wav	4,435	4,508	3,63	99,93
Z121-in.wav	Z121-out.wav	4,452	4,519	3,63	99,76
Z122-in.wav	Z122-out.wav	4,356	4,455	3,63	99,69
Z123-in.wav	Z123-out.wav	4,385	4,475	3,64	99,16
Z124-in.wav	Z124-out.wav	4,389	4,478	3,59	94,2

Příloha B: *Zdrojový kód pro přepočít PESQMOS na MOSLQO, mapovací funkce*

```
function m=MOS(p)
persistent a b c d
if isempty(a)
    a=0.999;
    b=4.999-a;
    c=-1.4945;
    d=4.6607;
end
if nargin>0
    m=a+b./(1+exp(c*p+d));
else
    if nargin<1 || isempty(p)
        pp=linspace(-0.5,4.5,100);
    else
        pp=p;
    end
    plot(pp,MOS(pp));
    title('Mapovací funkce PESQ - MOS')
    xlabel('PESQ (P.862)');
    ylabel('Mean Opimion Score (MOS)');
    grid
end
```

Zdrojový kód pro vyhodnocení závislosti MOS na jednotlivých technologiích

%-----ADSL-----

ADSL_PESQ=[3.705 3.283 2.873 3.46 3.164 3.8 3.345 3.376 3.089
3.148 3.55 2.803 3.273 3.084 2.831 2.91 3.039 2.92 3.132 3.297
2.448 2.717 3.076 3.101 3.283 3.415 3.31 3.256 2.743 3.173 3.435
3.058 3.195 2.393 3.061 2.915 2.778 2.693 3.122 2.915 2.42 2.715
2.566 3.524 3.209 2.701 2.975 2.727 3.057 2.283];

ADSL_AQuA=[3.64 3.63 3.64 3.53 3.63 3.54 3.62 3.39 3.64 3.64
3.58 3.54 3.62 3.63 3.59 3.63 3.64 3.63 3.63 3.64 3.58 3.57 3.62
3.61 3.64 2.38 3.62 3.63 3.19 3.64 3.55 3.63 3.63 3.48 3.6 3.14
3.62 3.62 3.63 3.54 3.63 3.63 3.62 3.64 3.6 3.64 3.64 3.53 3.48
3.55];

%-----ADSL reálný provoz-----

ADSL_real_PESQ=[1.948 1.994 1.969 2.558 2.03 3.372 2.765 1.592
1.52 2.696 1.962 1.291 1.376 1.977 1.445 2.609 3.208 3.584 3.155
3.496 3.267 3.985 3.369 3.196 3.602 3.317 3.085 2.902 2.181
2.588 2.483 2.492 2.38 2.192 2.827 2.63 3.232 1.948 2.588 2.873
3.106 1.864 2.643 1.601 1.909 2.234 2.209 2.195 3.066 3.031];

ADSL_real_AQuA=[3.54 3.41 3.44 3.19 3.59 3.06 3.37 2.85 3.35
3.42 3 2.38 2.86 2.86 2.87 2.96 3.63 3.62 3.44 3.57 3.29 3.57
3.55 3.58 3.49 2.23 3.47 3.26 3.53 3.54 1.01 3.54 3.52 2.41 3.56
3.36 3.55 2.48 3.43 3.44 3.36 2.75 .28 3.25 2.96 3.53 3.48 3.1
3.37 3.45];

%-----VDSL-----

VDSL_PESQ=[3.972 4.219 4.221 4.054 3.704 4.115 3.902 3.47 3.851
3.787 3.778 4.013 4.156 4.259 3.784 4.069 3.889 3.851 3.904
3.698 3.853 3.801 4.081 4.031 4.316 4.048 3.947 3.557 4.385
3.487 4.012 3.959 3.966 4.149 3.267 4.165 3.787 3.984 4.052
3.892 3.773 3.75 3.845 3.714 3.591 3.982 4.093 3.63 3.646
3.961];

VDSL_AQuA=[3.63 3.63 3.63 3.52 3.63 3.63 3.62 3.61 3.64 3.64
3.58 3.44 3.6 3.63 3.5 3.63 3.63 3.63 3.54 3.64 3.64 3.63 3.62
3.64 3.63 3.64 3.64 3.64 3.63 3.64 3.62 3.63 3.63 3.38 3.39 3.2
3.57 3.63 3.63 3.64 3.59 3.64 3.62 3.64 3.3 3.63 3.63 3.64 3.61
3.58];

%-----Ethernet-----

Ethernet_PESQ=[4.538 4.538 4.542 4.527 4.514 4.53 4.501 4.475
4.519 4.51 4.515 4.477 4.518 4.522 4.52 4.515 4.504 4.519 4.481
4.489 4.49 4.48 4.492 4.51 4.522 4.534 4.512 4.517 4.523 4.484
4.516 4.522 4.52 4.501 4.516 4.492 4.503 4.508 4.5 4.504 4.526
4.498 4.496 4.497 4.474 4.508 4.519 4.455 4.475 4.478];


```
Ethernet_AQuA=[3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.64 3.63 3.64 3.63
3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.62
3.64 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63 3.63
3.22 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63
3.64 3.59];
```

```
%-----WiFi-----
```

```
WiFi_PESQ=[3.916 4.151 4.315 4.403 4.041 4.38 4.347 4.128 3.931
4.45 4.081 4.171 4.12 3.981 4.068 4.35 4.291 3.578 4.307 4.135
3.824 4.2 3.795 4.046 4.107 4.185 4.097 4.517 4.037 4.085 4.065
3.804 3.989 3.396 4.497 4.172 3.648 3.795 4.241 4.504 3.94 4.498
4.109 4.03 4.366 3.797 4.072 3.604 3.711 4.059];
```

```
WiFi_AQuA=[3.64 3.52 3.63 3.63 3.64 3.64 3.64 3.55 3.64 3.63
3.63 3.63 3.64 3.64 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.62 3.64 3.63 3.62
3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.22
3.62 3.5 3.63 3.63 3.64 3.63 3.64 3.64 3.64 3.63 3.63 3.64 3.63
3.58];
```

```
%-----VDSL-----
```

```
WiMAX_PESQ=[4.538 4.538 4.542 4.527 4.514 4.53 4.501 4.475 4.519
4.51 4.515 4.477 4.518 4.522 4.52 4.515 4.504 4.519 4.481 4.489
4.49 4.48 4.492 4.51 4.522 4.534 4.512 4.517 4.523 4.484 4.516
4.522 4.52 4.501 4.516 4.492 4.503 4.508 4.5 4.504 4.526 4.498
4.496 4.497 4.474 4.508 4.519 4.455 4.475 4.478];
```

```
WiMAX_AQuA=[3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.64 3.63 3.64 3.63
3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.62
3.64 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63 3.63 3.22
3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63 3.64
3.59];
```

```
%-----WiFi reálná provoz-----
```

```
WiFi_real_PESQ=[3.534 4.538 4.542 4.527 3.826 4.53 4.501 4.475
4.519 4.51 4.515 4.477 1.786 3.054 3.474 3.814 4.504 3.668 4.481
4.489 4.49 4.48 4.114 3.523 4.522 4.534 4.512 4.517 4.523 4.484
4.516 4.522 4.52 4.501 4.516 4.492 4.503 3.314 3.225 3.339 3.445
3.19 3.062 4.069 3.593 3.904 3.647 4.455 4.119 3.748];
```

```
WiFi_real_AQuA=[3.62 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.64 3.63 3.64
3.63 3.63 3.63 3.29 3.55 3.55 3.59 3.63 3.64 3.63 3.64 3.63 3.63
3.62 3.62 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.64 3.63 3.63 3.63 3.63
3.22 3.63 3.39 3.56 3.45 3.64 3.61 3.63 3.64 3.63 3.63 3.64 3.63
3.58 3.61];
```

```
x=1:50;
y=1:25;
%-----Vsechny_PESQ-----
figure
subplot(6,1,1); plot(x,ADSL_PESQ), title('ADSL')
subplot(6,1,2); plot(x,ADSL_real_PESQ), title('ADSL-reál')
subplot(6,1,3); plot(x,VDSL_PESQ), title('VDSL')
subplot(6,1,4); plot(x,Ethernet_PESQ), title('Ethernet')
subplot(6,1,5); plot(x,WiFi_PESQ), title('WiFi')
subplot(6,1,6); plot(x,WiMAX_PESQ), title('WiMAX')

%-----ADSL-----
figure % new figure
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(x,ADSL_PESQ,x,ADSL_AQuA);
title('ADSL')
xlabel('Testované vzorky')
ylabel(hAx(1),'MOS - PESQ (P.862)') % left y-axis
ylabel(hAx(2),'MOS - AQuA') % right y-axis
grid

%-----ADSL reálný provoz-----
figure % new figure
[hAx,hLine3,hLine4] = plotyy(x,ADSL_real_PESQ,x,ADSL_real_AQuA);
title('ADSL-reálný provoz')
xlabel('Testované vzorky')
ylabel(hAx(1),'MOS - PESQ (P.862)') % left y-axis
ylabel(hAx(2),'MOS - AQuA') % right y-axis
grid

%-----VDSL-----
```

```
figure % new figure
[hAx,hLine5,hLine6] = plotyy(x,VDSL_PESQ,x,VDSL_AQuA);
title('VDSL')
xlabel('Testované vzorky')
ylabel(hAx(1),'MOS - PESQ (P.862)') % left y-axis
ylabel(hAx(2),'MOS - AQuA') % right y-axis
grid

%-----Ethernet-----
figure % new figure
[hAx,hLine7,hLine8] = plotyy(x,Ethernet_PESQ,x,Ethernet_AQuA);
title('Ethernet')
xlabel('Testované vzorky')
ylabel(hAx(1),'MOS - PESQ (P.862)') % left y-axis
ylabel(hAx(2),'MOS - AQuA') % right y-axis
grid

%-----WiFi-----
figure % new figure
[hAx,hLine9,hLine10] = plotyy(x,WiFi_PESQ,x,WiFi_AQuA);
title('WiFi')
xlabel('Testované vzorky')
ylabel(hAx(1),'MOS - PESQ (P.862)') % left y-axis
ylabel(hAx(2),'MOS - AQuA') % right y-axis
grid

%-----WiMAX-----
figure % new figure
[hAx,hLine11,hLine12] = plotyy(x,WiMAX_PESQ,x,WiMAX_AQuA);
title('WiMAX')
xlabel('Testované vzorky')
```

```

ylabel(hAx(1),'MOS - PESQ (P.862)') % left y-axis
ylabel(hAx(2),'MOS - AQUA') % right y-axis
grid

%-----PESQ_all-----
figure
plot(x,ADSL_PESQ,'r')
hold on
plot(x,ADSL_real_PESQ,'g')
plot(x,VDSL_PESQ,'b')
plot(x,Ethernet_PESQ,'k')
plot(x,WiFi_PESQ,'m')
plot(x,WiFi_real_PESQ,'c')
plot(x,WiMAX_PESQ,'k')
grid on;
axis ([1 50, 1 5])
legend('ADSL','ADSL-reál','VDSL','Ethernet','WiFi','WiMAX')
title('PESQ')
xlabel('Testované vzorky')
ylabel('MOS - PESQ (P.862.1)') % left y-axis

%-----PESQ_xDSL-----
figure
plot(x,ADSL_PESQ,'r')
hold on
plot(x,ADSL_real_PESQ,'b')
plot(x,VDSL_PESQ,'k')
grid on;
axis ([1 50, 1 5])
legend('ADSL','ADSL-reál','VDSL')
title('PESQ - xDSL')

```

```
xlabel('Testované vzorky')
ylabel('MOS - PESQ (P.862.1)') % left y-axis

%-----PESQ_eth-wifi-wimax-----
figure
plot(x,Ethernet_PESQ,'k')
hold on
plot(x,WiFi_PESQ,'b')
plot(x,WiFi_real_PESQ,'r')
plot(x,WiMAX_PESQ,'k')
grid on;
axis ([1 50, 1 5])
legend('Ethernet+WiMAX','WiFi','WiFi-reál')
title('PESQ - Ethernet, WiFi, WiMAX')
xlabel('Testované vzorky')
ylabel('MOS - PESQ (P.862.1)') % left y-axis
```